

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ЗГОРЯННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА В ТОПЦІ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Курсова робота з дисципліни

**«Комп’ютерне моделювання процесів в енергетичному
обладнанні»**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за освітньою
програмою «Моделювання і комп’ютерні технології в теплофізиці»
спеціальності 144 «Теплоенергетика» та освітньою програмою
«Інженерія і комп’ютерні технології теплоенергетичних систем»
спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»*

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського

2021

CFD-моделювання згоряння газоподібного палива в топці котельного агрегату. Курсова робота з дисципліни «Комп'ютерне моделювання процесів в енергетичному обладнанні» [Текст] : навч. посіб. для студентів спеціальності 144 “Теплоенергетика” (освітня програма “Моделювання і комп'ютерні технології в теплофізиці”) та 142 “Енергетичне машинобудування” (освітня програма “Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем”) / укладач О. В. Баранюк; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 52 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 25.02.2021 р.) за поданням Вченої ради ТЕФ (протокол № 9 від 24.02.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ЗГОРЯННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА В ТОПЦІ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Курсова робота з дисципліни

«Комп'ютерне моделювання процесів в енергетичному обладнанні»

Укладач: *Баранюк Олександр Володимирович, к.т.н., доц. каф. АЕС і*
Відповідальний
редактор *Воробйов М.В., к.т.н., ст. викл каф. АЕС і ІТФ*
Рецензент *Воропаєв Геннадій Олександрович, член-кор НАН України, д-р ф-м. наук, проф., заст., директора ІГМ НАН України*
Сірий Олександр Анатолійович, доц., к.т.н., доц. каф. ТЕУ Т АЕС

В посібнику викладена послідовність використання програмного комплексу Ansys для моделювання спалювання і транспорту газів, які мають місце в топці котельного агрегату. Метою навчального посібника є формування у студентів знань і умінь розробляти математичні моделі процесів в енергетичному обладнанні з використанням сучасних CAD/CAM/CAE систем, виконувати аналіз результатів та розробляти нові методики розрахунків для проектування енергетичних об'єктів і систем.

Посібник може бути корисним для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються дослідженням та розробкою сучасних високоефективних теплообмінних пристроїв, де використовуються умови, характерні для вимушеної конвекції, процесів спалювання палива.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

Вступ

Відомо, що застосування сучасних CFD-методів обчислювальної гідродинаміки (Computation Fluid Dynamics) потребує підготовки коректної CFD-моделі, яка повинна відображати сутність фізичного процесу, який досліджується. Таким чином, майбутні фахівці спеціальності „Теплоенергетика” повинні мати вміння побудови CFD-моделей, як того потребують сучасні тенденції.

Курсова робота з дисципліни „Комп’ютерне моделювання енергетичних процесів і систем” виконується після вивчення теоретичного курсу з метою виконання наступних основних задач:

- надання студентам умінь моделювання геометрії елементів теплоенергетичного устаткування складної конфігурації і створення на її основі розрахункових сіток, які дозволяють представити фізико-математичний опис процесів, що в них протікають, за допомогою широко розповсюдженого та загально визнаного програмного комплексу ANSYS;
- розширення кола знань студентів з математичного моделювання та числового рішення математичних моделей конвективного теплообміну, що застосовуються в інженерній енергетичній практиці, шляхом вивчення спеціальної літератури, довідників, науково-технічних статей та інш.;
- розвиток творчої ініціативи студентів при самостійному вирішенні поставлених перед ними задач.
- налаштовувати таблицю PDF (PDF table) для газоподібного палива використовуючи передпроцесор prePDF;
- визначати вхідні параметри для моделі горіння без попереднього змішування.

Результати чисельного моделювання потрібно представити так, щоб була можливість пояснити з фізичної точки зору явища, які моделюються.

При оцінюванні виконаної студентом роботи бажано враховувати наступні вимоги:

- ◆ фізичність результатів моделювання.
- ◆ наявність графічного підтвердження співпадіння результатів моделювання і аналітичного розрахунку.
- ◆ повних відповідей на контрольні запитання, що приводяться в посібнику до виконання лабораторних робіт.

В разі невідповідності будь-якому з пунктів перерахованих вимог, за кожен не виконаний пункт, від максимальної оцінки за захист роботи (наприклад, 5 балів) віднімається один бал.

1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Метою курсової роботи є поглиблення знань студентів з теорії і практики моделювання процесів спалювання газоподібного палива.

В якості завдання на розрахунок виконати CFD-моделювання поширення продуктів згоряння в топці котельного агрегату ГМ-50-1 і визначити дійсну температуру димових газів на виході з топки. Отримані розрахункові дані, потрібно порівняти з результатами аналітичного розрахунку теплообміну в топці, який виконати за допомогою відомої методики [1, 2]. Курсова робота повинна містити наступні розділи:

- Огляд літератури. Повинен містити аналіз опублікованих робіт за тематикою курсової роботи виконані іншими авторами, що взяти з доступної літератури. Мета цього розділу – визначення найбільш перспективної методики моделювання реакції горіння та наповнення роботи.

- Методика CDF-моделювання. Повинен містити опис послідовності створення скінчено-елементної моделі об'єкту дослідження, опис математичної моделі та аналітичний розрахунок топкової камери.

- Обробка результатів досліджень. Повинен містити результат обробки скінчено-елементної моделі у вигляді векторних і контурних полів швидкостей та температур, а також масових часток компонентів реакції в характерних перерізах топкової камери, які необхідні для аналізу результатів роботи.

- Висновки. В яких привести результат верифікації з аналітичним розрахунком і причини їх неспівпадіння (якщо вони є).

В якості прикладу, нижче приведений тепловий розрахунок котельного агрегату ГМ-50-1.

1.1 Завдання на курсову роботу

Завданням до курсової роботи є розробка CFD-моделі топкової камери котельного агрегату ГМ-50-1 за допомогою якої слід визначити температуру димових газів на виході із топки і верифікувати її з аналітичним розрахунком. Розміри топки розрахувати за допомогою приведеної нижче методики. Результат розрахунку використати для створення тривимірної моделі і кресленика загального виду котельного пучка труб.

Котлоагрегат ГМ-50 (рис. 1.1) призначений для роботи на природному газі та нафті. Котел двохбарабанний з природною циркуляцією, має П-подібну компоновку з винесеним водяним економайзером. Всі стіни камери згоряння закривають радіаційні поверхні нагрівання, які утворюючи фронтний, задній і бічні екрани. До конвективних поверхонь нагрівання відносяться: котельний пучок, труби, повітряпідігрівач і водяний економайзер. Труби заднього і фронтного екрану в нижній частині утворюють холодну воронку. Труби заднього екрану у верхній частині розведені в чотирирядний фестон. У поворотній камері газопроходу розташовані труби пароперегрівача і трубчастий підігрівач повітря вертикального типу.

Введення палива в топку здійснюється за допомогою вихрових пальників з тангенціальним підведенням повітря, розташованих на бічних стінах топки. Подача в топку необхідного для горіння повітря здійснюється за допомогою дуттєвого вентилятора.

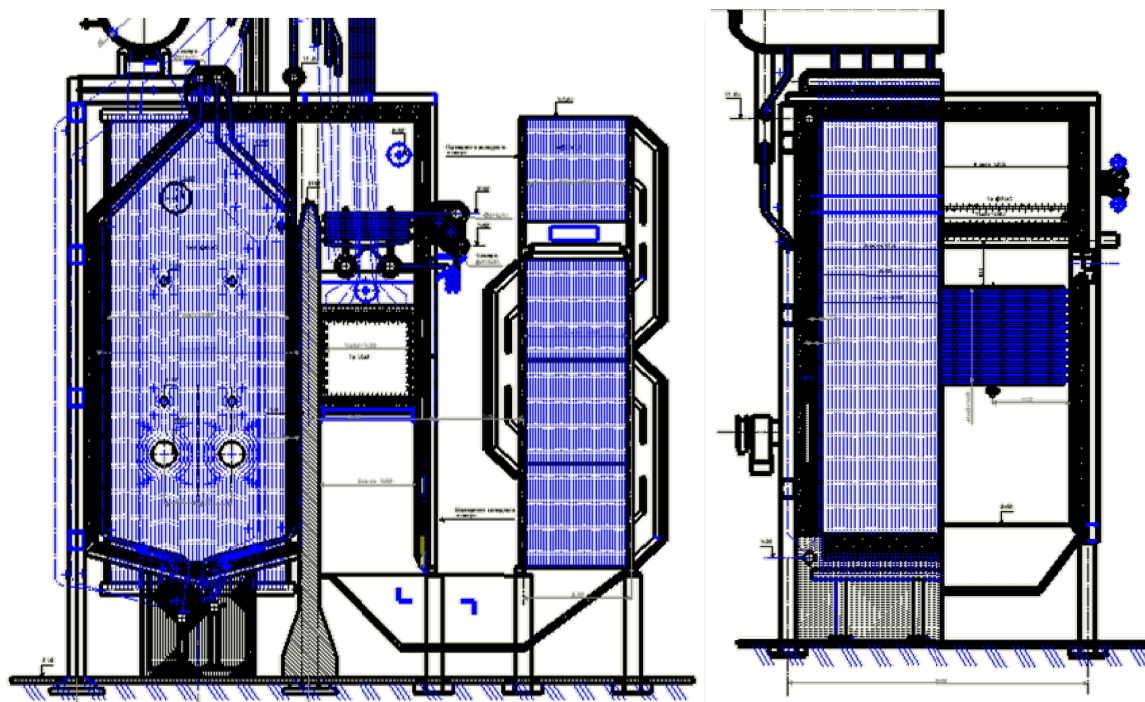


Рис. 1.1 – Поздовжній і поперечний розріз котла ГМ-50

Таблиця 1.1. Вихідні дані

Найменування	Варіант									
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10
$D_{\text{пк}}$, т/год	70	84	101	106	91	109	131	157	165	86
$P_{\text{пн}}$, МПа	4,3	5,2	6,2	6,5	5,6	6,7	8	9,6	10,1	5,3
$t_{\text{пн}}$, °C	435	522	626	657	566	679	815	978	1027	532
$t_{\text{жв}}$, °C	155	186	223	234	202	242	290	348	365	190
$\theta_{\text{від}}$, °C	120	144	173	182	156	187	224	269	282	147
$t_{\text{хл}}$, °C	30	36	37	32	36	37	34	41	38	36
- вид палива	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₇ H ₁₆	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₇ H ₁₆	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₇ H ₁₆	C ₃ H ₈
$Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ МДж/кг [3]	35,5	59,7	187,8	35,5	59,7	187,8	35,5	59,7	187,8	59,7

Початкові дані, необхідні для виконання роботи, перераховані в табл. 1.1 відповідно до виду палива:

- паропродуктивність парового котла $D_{\text{пк}}$, т/год;

- тиск пари перед головним паровим засувом $P_{пз}$, МПа;
- температура перегрітої пари $t_{пг}$, °С;
- температура живильної води перед економайзером $t_{жв}$, °С;
- температура димових газів на виході з котельного агрегату $\theta_{від}$, °С;
- температура повітря в оточуючому середовищі $t_{хл}$, °С;
- вид палива.

З метою своєчасного захисту курсової роботи при підготовці переліку необхідних глав, зміст яких приведений в розділі 1, слід притримуватися заранніє затвердженого календарного плану (табл. 1.2).

Таблиця 1.2. Графік виконання курсової роботи

Тиждень семестру	Назва етапу роботи	Максимальна кількість балів
2-3	<i>Підбір та вивчення літератури за тематикою роботи</i>	10
4-8	<i>Методика CDF-моделювання. Створення скінчено-елементної моделі об'єкту дослідження.</i>	20
8-11	<i>Проведення числових розрахунків з розробленою моделлю в рамках заданих діапазонів швидкостей і теплових навантажень</i>	20
11-13	<i>Оформлення результатів досліджень. Написання глав курсової роботи</i>	10
14-16	<i>Створення тривимірної моделі і креслеників.</i>	10
17-18	<i>Захист курсової роботи</i>	40

Під час курсового проектування враховується своєчасність виконання графіку роботи, коректність застосування методів аналізу і розрахунку, якість оформлення, виконання вимог нормативних документів і якість графічного матеріалу і дотримання вимог ДСТУ.

2 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ АНАЛІТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТОПКОВОЇ КАМЕРИ

Перед проведенням числових розрахунків за допомогою пакету прикладних програм ANSYS-CFX необхідно визначити розрахункову область, що є топковою камерою парового котла. Топкова камера є об'ємним паралелепіпедом, обшитим по площині стін парогенеруючими трубами, і призначається для факельного спалювання палива. На фронтівій стіні топки розміщено вихрові пальники, через яких горюча суміш подається в топковий об'єм.

Приклад розрахунку топкової камери (розрахункової області для ANSYS-CFX) та витрат повітря та палива представлений в розміщених нижче розділах.

3.1 Розрахунок теоретичних об'ємів продуктів згорання палива

Теоретично необхідна кількість повітря для спалювання 1 м³ газового палива:

$$V^0 = 0,0467 \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Теоретичний об'єм азоту в продуктах згорання при спалювання 1 м³ газового палива або 1 кг рідкого або твердого палива:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^p, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ або } \text{м}^3/\text{кг}$$

Теоретичний об'єм трьохатомних газів у продуктах згорання при спалювання 1 м³ газового палива:

$$V_{R_2}^0 = 0,01 \sum m C_m H_n, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Теоретичний об'єм водяних парів у продуктах згорання при спалювання 1 м³ газового палива:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124 d_{г.п.} + 1,61 V^0 \right), \text{ м}^3/\text{м}^3$$

де $d_{г.п.} = 4,5$ – вологовміст газового палива по відношенню до 1 м³ сухого газу, г/м³.

2.1.1 Розрахунок коефіцієнту надлишку повітря та його присосів в газовому тракті котла.

У реальних умовах організації процесу горіння неможливо досягнути повного згорання палива при подачі в топку теоретично необхідної кількості повітря V^0 , тому кількість повітря, яка подається в топку, має бути більшої від теоретично необхідної. Відношення дійсної кількості повітря до теоретично необхідної називають коефіцієнтом надлишку повітря α .

Приклад розрахунку коефіцієнтів надлишку повітря в газовому тракті котла приведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Приклад розрахунку коефіцієнтів надлишку повітря в газовому тракті котла

Найменування газоходу	Присмок повітря в газоході	Надлишок повітря за поверхнею нагріву
Топка, фестон	$\Delta\alpha_T=1,00$ $\Delta\alpha_\phi=0$	$\alpha_T=\alpha_T+\Delta\alpha_T=0,05+1,01=1,05$; $\alpha_\phi=\alpha_T+\Delta\alpha_\phi=1,05+0=1,05$;
Пароперегрівник (ПП I)	$\Delta\alpha_{ппI}=0,015$	$\alpha_{ппI}=\alpha_\phi+\Delta\alpha_{ппI}=1,05+0,015=1,065$;
Пароперегрівник (ПП II)	$\Delta\alpha_{ппII}=0,015$	$\alpha_{ппII}=\alpha_{ппI}+\Delta\alpha_{ппII}=1,065+0,015=1,08$;
Водяний економайзер (ВЕ)	$\Delta\alpha_{вс}=0,08$	$\alpha_{вс}=\alpha_{ппII}+\Delta\alpha_{вс}=1,08+0,08=1,16$;
Повітропідігрівник (Пов. П)	$\Delta\alpha_{пов.п}=0,06$	$\alpha_{пов.п}=\alpha_{вс}+\Delta\alpha_{пов.п}=1,16+0,06=1,22$

2.1.2 Розрахунок дійсних об'ємів продуктів згорання.

Для кожної ділянки газового тракту здійснюється розрахунок дійсних об'ємів продуктів згорання з врахуванням присосів по тракту.

Середній коефіцієнт надлишку повітря у поверхні нагріву:

$$\bar{\alpha} = (\alpha_{i-1} + \alpha_i)/2$$

Дійсний об'єм водяних парів:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\bar{\alpha} - 1)V^0, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ або } \text{м}^3/\text{кг}$$

Дійсний об'єм димових газів:

$$V_r = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + (\bar{\alpha} - 1)V^0, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ або } \text{м}^3/\text{кг}$$

Об'ємна доля трьохатомних газів:

$$r_{RO_2} = V_{RO_2}/V_r$$

Об'ємна доля водяних парів:

$$r_{H_2O} = V_{H_2O}/V_r$$

Об'ємна доля трьохатомних газів та водяних парів:

$$r_{\Pi} = r_{RO_2} + r_{H_2O}$$

2.1.3 Розрахунок ентальпії продуктів згорання.

Для кожної ділянки газового тракту здійснюється розрахунок ентальпій продуктів згорання з врахуванням присосів по тракту.

Ентальпія газів, що утворилися при спалюванні 1 м³ газового палива або 1 кг рідкого або твердого палива, при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha=1$ та температурі ϑ , °C:

$$h_r^0 = V_{RO_2}(c\vartheta)_{CO_2} + V_{N_2}^0(c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0(c\vartheta)_{H_2O}, \text{ кДж/м}^3 \text{ або кДж/кг}$$

Ентальпія повітря, необхідного при спалюванні 1 м³ палива при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha=1$ та температурі ϑ , °C:

$$h_{\text{пов}}^0 = V^0(c\vartheta)_{\text{пов}}, \text{ кДж/м}^3 \text{ або кДж/кг}$$

Ентальпії 1 м^3 повітря $(c\vartheta)_{\text{пов}}$, вуглекислого газу $(c\vartheta)_{\text{CO}_2}$, азоту $(c\vartheta)_{\text{N}_2}$ та водяної пари $(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$ є табличними величинами.

Ентальпія продуктів згорання на 1 м^3 газового палива або 1 кг рідкого або твердого палива:

$$h = h_{\text{r}}^0 + (\alpha - 1)h_{\text{пов}}^0$$

За результатами розрахунку ентальпій будується графік залежності ентальпій від температури продуктів згорання [2].

Результат розрахунку ентальпії продуктів згорання потрібно порівняти з розрахунковими даними (рис. 2.1).

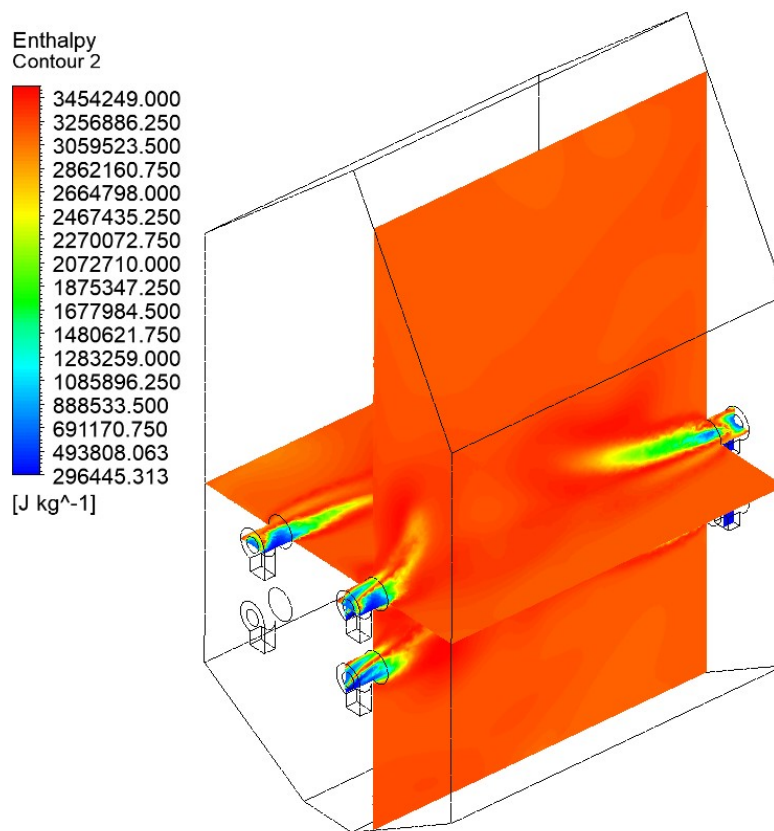


Рис. 2.1. – Результат CFD-моделювання ентальпії димових газів

2.2 Тепловий баланс котла

Складення теплового балансу котла полягає у встановленні рівності між кількістю теплоти, що поступила в котел, що називається

наявною теплотою Q_p^p та сумою корисно використаної теплоти Q_1 і теплових втрат Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 і Q_6 . На основі теплового балансу розраховують ККД котла і необхідну витрату палива.

Тепловий баланс розраховується відносно сталого теплового стану котла на 1 м^3 газового палива або 1 кг твердого або рідкого палива при 0°C і $101,3 \text{ кПа}$.

Загальне рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \text{ кДж/м}^3 \text{ або кДж/кг}$$

В даній роботі значення наявної теплоти Q_p^p на 1 м^3 газового палива відповідає значенню нижчій теплоті згоряння палива:

Втрата теплоти з відхідними газами визначається як різниця ентальпій продуктів згорання на виході з котла й холодного повітря:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} \cdot 100\% = \frac{(h_{\text{відх}} - \alpha_{\text{відх}} h_{\text{хп}}^0)(100 - q_4)}{Q_p^p}, \%$$

де $h_{\text{відх}}$ – ентальпія відхідних газів при відповідному надлишку повітря $\alpha_{\text{відх}}$ і температурі $\vartheta_{\text{відх}}$, кДж/м^3 або кДж/кг .

Втрата теплоти з хімічним недопалом $q_3 = Q_3 \cdot 100 / Q_p^p, \%$ обумовлена сумарною теплотою згорання продуктів неповного горіння, що залишаються у відхідних газах.

Втрата теплоти з механічним недопалом $q_4 = Q_4 \cdot 100 / Q_p^p, \%$ обумовлена недопалом палива в шлаках, провалі та виносі (при частковому поверненні останнього в топку враховується тільки виніс, який не був уловлений пристроями для повернення).

Значення q_3 та q_4 визначаються за таблицями (табл. XX, стр.175 [1];) залежно від робочого палива, способу спалювання, типу топки та продуктивності котла D .

Втрати теплоти від зовнішнього охолодження $q_5 = Q_5 \cdot 100 / Q_p^p, \%$ для стаціонарних котлів приймаються за даними рис. 2.2 [2].

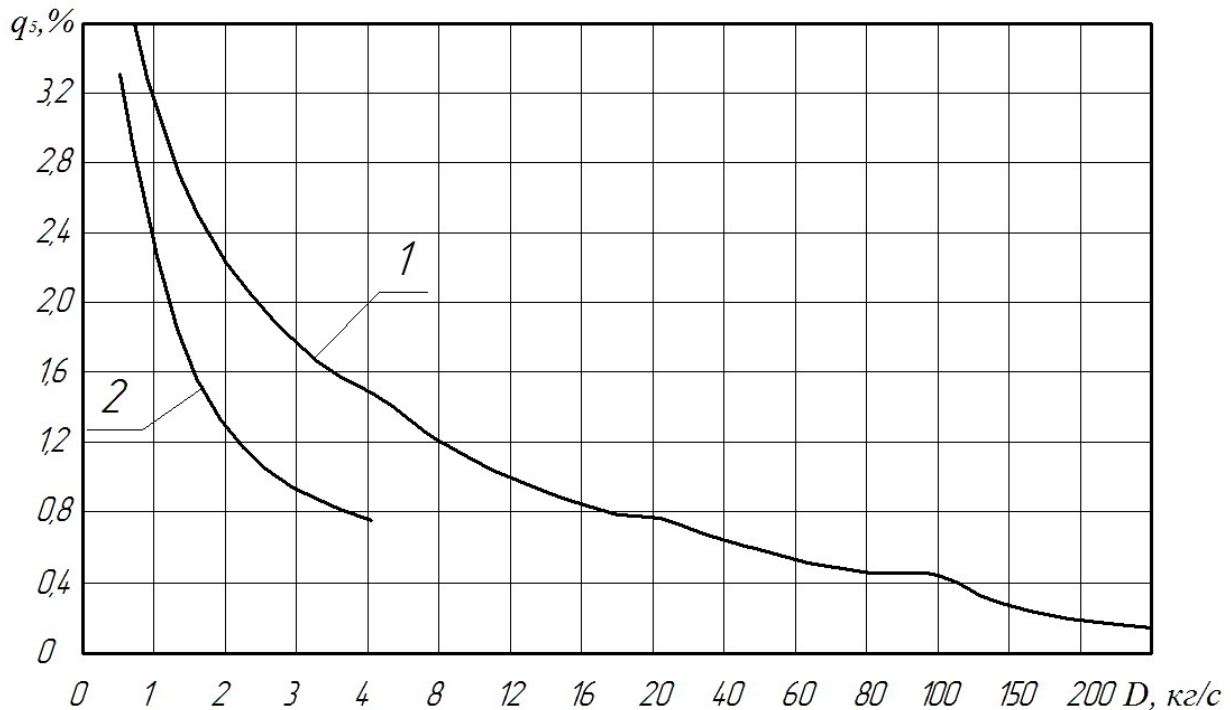


Рис. 2.2. – Втрати теплоти від зовнішнього охолодження [2]

1 – котельний агрегат (із хвостовими поверхнями); 2 – власне котел (без хвостових поверхонь)

При паропроductивності котла більше 250 кг/с q_5 приймається рівними 0,2%.

Розбиття втрат теплоти від зовнішнього охолодження по окремим газоходам практично не впливає на результати розрахунку. Долі цих втрат, що припадають на окремі газоходи, для спрощення приймають пропорційними кількості теплоти, що віддається газами в окремих газоходах. Тому втрати від зовнішнього охолодження враховуються введенням у формулу для розрахунку кількості теплоти, відданої газами, коефіцієнта збереження теплоти:

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_k + q_5}, \%$$

Коефіцієнт корисної дії котла (брутто):

$$\eta_k = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5, \%$$

Корисно використана теплота в топці:

$$Q_{\text{кор}} = D(h_{\text{пп}} - h_{\text{жв}}), \text{ кДж/м}^3 \text{ або кДж/кг}$$

$h_{\text{пп}}$ – ентальпія перегрітої пари, кДж/кг; визначається за тиском перегрітої пари $P_{\text{пп}}$ і температурою перегрітої пари $t_{\text{пп}}$ (табл. XXV стр. 184 [1]);

$h_{\text{жв}}$ – ентальпія живильної води, кДж/кг; визначається за тиском живильної води на вході в котел, який умовно приймається як $P_{\text{жв}} = 1,2P_{\text{пп}}$, та температури живильної води $t_{\text{жв}}$ (табл. XXIV стр. 181 [1]).

Витрата палива на котел

$$B = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}}, \text{ м}^3/\text{с або кг/с}$$

Для підрахунку сумарних об'ємів продуктів згорання та повітря, а також теплоти, що віддається газами поверхням нагріву, вводиться розрахункова витрата палива, яка враховує механічну неповноту згорання:

$$B_{\text{р}} = B \left(1 - \frac{q_4}{100} \right), \text{ м}^3/\text{с або кг/с}$$

2.3 Розрахунок топкової камери

2.3.1 Розрахунок основних розмірів топкової камери.

Площа поперечного перерізу амбразури пальника для рідкого та газового палива:

$$f_{\text{а}} = 1,1 \frac{V^0(\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha)}{Z_3 W_3} \cdot \frac{t_{\text{г.пов}} + 27}{273}, \text{ м}^2$$

де $\alpha_{\text{т}}$ – надлишок повітря в топці, $\Delta\alpha$ – присмок повітря в топці;

W_3 – швидкість суміші палива й повітря, м/с; приймається в межах 20÷50 м/с. Повинна збігатися з розрахованою засобами CFX (рис. 2.3);

Z_n – кількість пальників, обирається за прототипом;

$t_{\text{г.пов}}$ – температура гарячого повітря, °С.

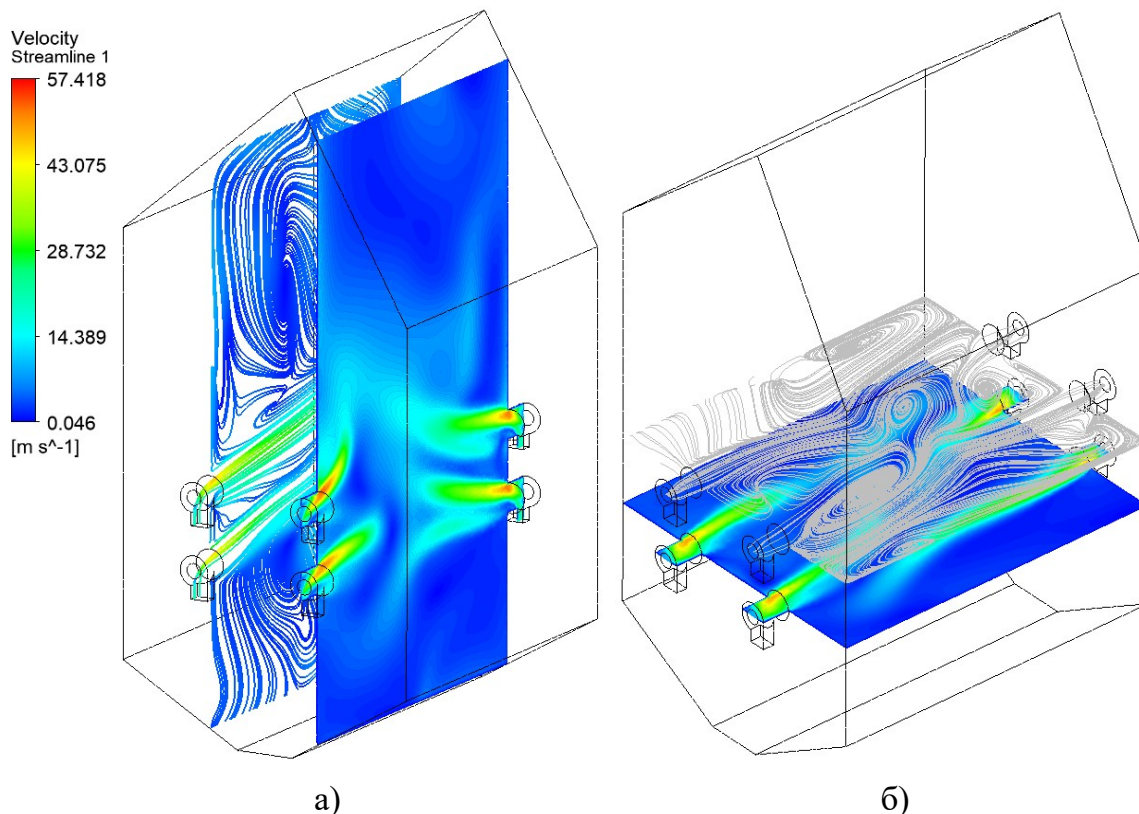


Рис. 2.3 – Розподіл швидкостей суміші в поздовжньому (а) і поперечному (б) перерізах топки через пальники:

Діаметр амбразури пальника:

$$D_a = 1,13\sqrt{f_a}, \text{ м}$$

Розмір D_a округлюється до найближчого значення, представленого в табличному вигляді [2].

Ширина топки при фронтальному або зустрічно-фронтальному розташуванні пальників:

$$b = 2b_1 + (Z_1 - 1)b_2, \text{ м}$$

де Z_1 – максимальна кількість пальників в одному ярусі;

b_1 – відстань від осі пальника до суміжної бічної поверхні, м; залежить від діаметру амбразури та характеристик топкової камери й визначається, допомогою залежності $b_1 = 3D_a$. (у випадку спалювання газоподібного палива).

b_2 – відстань між осями пальників по горизонталі, м; залежить від діаметру амбразури та характеристик топкової камери й визначається

як $b_2 = k_2 \cdot D_a$, де k_2 для газового або рідкого палива вибирається в діапазоні від 2,5 до 4,0.

Мінімально допустимий переріз топки:

$$f_T^{min} = \frac{B_p Q_H^p}{q_f}, \text{ м}^2$$

де q_f – максимально допустиме теплове напруження топкового перерізу, кВт/м²; обирається в діапазоні 4000-2000.

Мінімально допустима глибина топки при фронтovому або зустрічно-фронтovому розташуванні пальників:

$$a_{min} = \frac{f_T^{min}}{b}, \text{ м}$$

Глибина топки обирається конструктивно із умови $a \geq a_{min}$.

Глибина топки при продуктивності більше 120 т/год та при спалюванні газу й мазуту може прийматися рівною $a = (5...7)D_a$.

Глибина топки при зустрічно-боковому розташуванні пальників:

$$a = 2a_1 + (Z_1 - 1)a_2, \text{ м}$$

де a_1, a_2 – величини, аналогічні b_1, b_2 , м.

Мінімально допустима ширина топки при зустрічно-боковому розташуванні пальників:

$$b_{min} = \frac{f_T^{min}}{a}, \text{ м}$$

Ширина топки обирається конструктивно із умови $b \geq b_{min}$. При цьому значення b не повинно бути меншим: $(5...7)D_a$ – для рідкого або газового палива.

Об'єм топкової камери приймається рівним мінімально допустимому:

$$V_T^{min} = \frac{B_p Q_H^p}{q_v^{max}}, \text{ м}^3$$

де q_v^{max} – максимально допустиме теплове напруження топкового об'єму, кВт/м³; визначається залежно від типу палива та характеристик топки (табл. XX с. 175 [1]).

Мінімальна висота топки:

$$h_T = \frac{V_T^{min}}{a \cdot b}, \text{ м}$$

Висота вікна фестону:

$$c = \frac{B_p V_T (\vartheta_T'' + 273)}{W_T b (1 - B d) \cdot 273}, \text{ м}$$

де ϑ_T'' – температура продуктів згорання на виході з топки, для газового й рідкого палива стосовно котлів типу ГМ-50-1 вибирається в діапазоні від 1050 до 1100 °С;

B – коефіцієнт, що враховує наявність у вихідному вікні топки фестону; для котла ГМ-50-1 $B=4,44$;

d – діаметр екранних труб, м; для всіх енергетичних парових котлів $d=0,06$ м.

2.3.2 Розрахунок конструктивних розмірів топкової камери.

Лінійні розміри верхньої частини бокової стінки для парового котла типу ГМ-50-1 (рис. 1.1).

$$l_8 = c \cos \gamma, \text{ м}$$

$$l_7 = a - l_8, \text{ м}$$

$$l_1 = l_7 / \cos \varphi, \text{ м}$$

$$h_4 = \frac{c}{2} \sin \gamma, \text{ м}$$

$$h_5 = c \sin \gamma - l_1 \sin \varphi, \text{ м}$$

Лінійні розміри воронки бокової стінки:

– половина висоти воронки:

$$h_1 = \left(\frac{a - \kappa}{2} \right) \operatorname{tg} \alpha, \text{ м}$$

– половина довжини скату воронки:

$$l_3 = h_1 / \sin \alpha, \text{ м}$$

Воронка утворюється шляхом нахилу фронтової та задньої поверхонь топки всередину під кутом $\alpha = 30 \dots 35^\circ$ до вертикалі. Отвір

у нижній частині воронки має розмір $\kappa = 0,8 \dots 1,2$ м і довжину, що дорівнює ширині топки.

Лінійні розміри центральної частини бокової стінки:

$$h_2 = h_T - h_1 - h_4, \text{ м}$$

$$l_2 = h_2 + h_5, \text{ м}$$

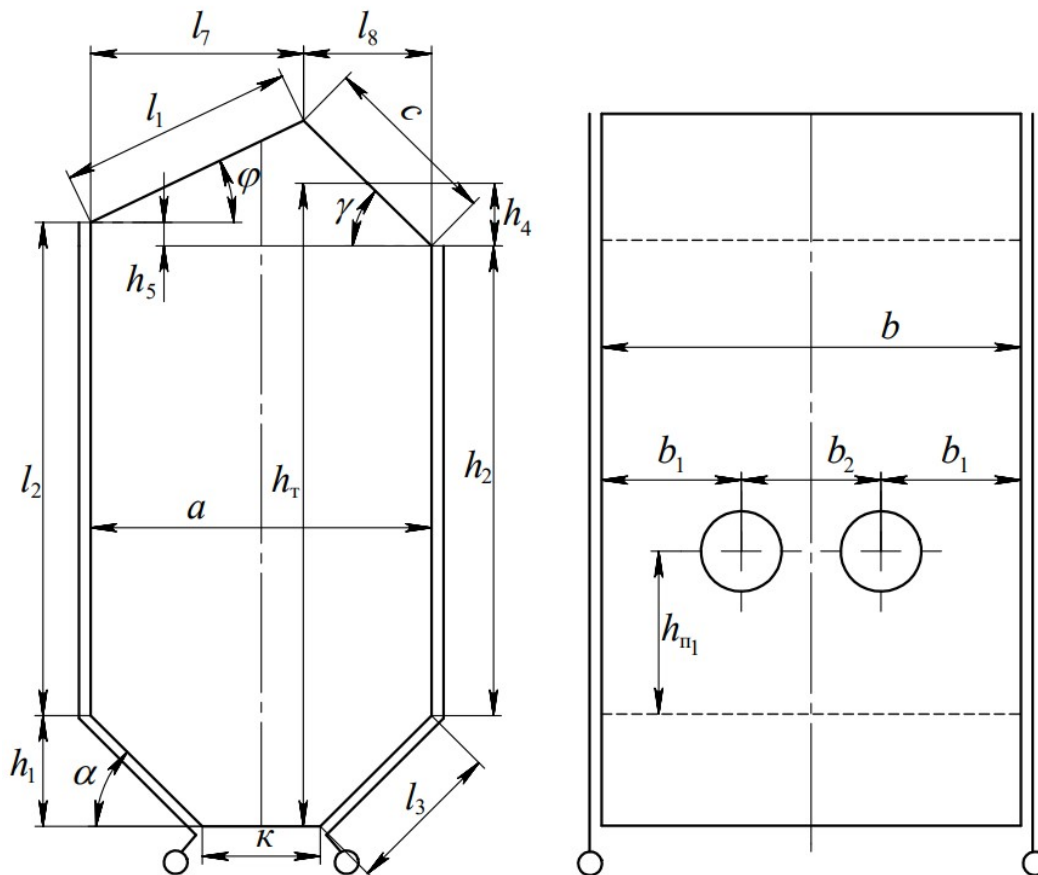


Рис. 2.4 – Конфігурація стін топки типового парового котла типу ГМ-50-1

Площі елементарних фігур бокової стінки для парових ГМ-50-1 (рис. 2.5):

$$F_1 = \frac{1}{2}(a + \kappa) \cdot h_1, \text{ м}^2$$

$$F_2 = a \cdot h_2, \text{ м}^2$$

$$F_4 = \frac{1}{2}(h_5 + c \sin \gamma)l_7 + \frac{c \sin \gamma}{2}l_8, \text{ м}^2$$

Значення кутів α , γ , ϕ відповідно 30, 60, 40°.

Площа бокової стіни топки:

$$F_6 = \sum_i F_i, \text{ м}^2$$

Площа фронтальної стіни топки:

$$F_{\text{фр}} = \left(l_1 + l_2 + l_3 + \frac{\kappa}{2} \right) \cdot b, \text{ м}^2$$

Площа задньої стіни топки:

$$F_3 = \left(\frac{\kappa}{2} + l_3 + h_2 \right) \cdot b, \text{ м}^2$$

Площа вікна фестона:

$$F_{\text{вф}} = c \cdot b, \text{ м}^2$$

Загальна площа стін топки:

$$F_{\text{ст}} = F_{\text{фр}} + 2F_6 + F_3 + F_{\text{вф}}, \text{ м}^2$$

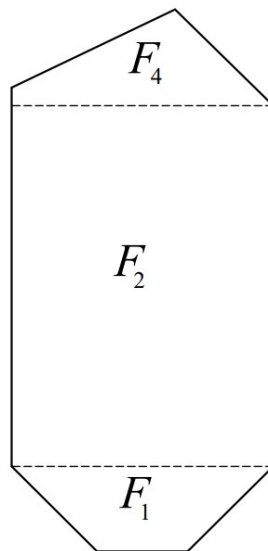


Рис. 2.5 – Перелік площ елементарних фігур бічної стінки топки

Об'єм топкової камери:

$$V_{\text{т}} = F_6 \cdot b, \text{ м}^3$$

Висота розташування пальників:

- 1) для одноярусного розташування пальників за наявності холодної воронки (рис. 5, а,б):

$$h_{\text{п}} = h_1 + h'_{\text{п}}, \text{ м}$$

де $h'_{\text{п}}$ – відстань від осі пальника до початку скату холодної воронки, м; таблична величина, що визначається за типом пальників.

- 2) для двоярусного розташування пальників при однаковій витраті палива кожним:

$$h_{\pi} = \frac{h_{\pi_1} Z_1 + h_{\pi_2} Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

де h_{π_1}, h_{π_2} – відповідно висота розташування пальників першого й другого ярусів, м;

Z_1, Z_2 – відповідно кількість пальників першого й другого ярусів.

Для парових котлів ГМ-50-1 та ГМ-50-14 $h_{\pi_1} = 3D_a$, м; $h_{\pi_2} = h_{\pi_1} + (2,5 \dots 3)D_a$, м.

Екранована площа фронтової стіни:

$$F_{\text{фр}}^{\text{екр}} = F_{\text{фр}} - 2m(l_1 + l_2 + l_3 + l_4) - Z_{\pi} f_a, \text{ м}^2$$

Екранована площа задньої стіни:

$$F_3^{\text{екр}} = F_3 - 2m(h_2 + l_3 + l_4), \text{ м}^2$$

Екранована площа бічної стіни:

$$F_6^{\text{екр}} = F_6 - 2m(h_2 + l_2) - \Delta F_i, \text{ м}^2$$

де $\Delta F_i, \text{ м}^2$ – площа неекранованих ділянок i -тої стіни під пальники, амбразури, лази, лючки тощо. В даній роботі, становить $0,2 \text{ м}^2$.

Екранована площа вікна фестона приймається такою ж як площа вікна фестону.

Крок труб фронтового екрану $S_{\text{фр}}$ вибрати в діапазоні $(1,3 \dots 1,4)d$ (d – зовнішній діаметр труб, якими екранована топка котла). Крок труб бічного S_6 і S_3 заднього екранів вибрати в діапазоні $(1,2 \dots 1,4)d$.

До числа неекранованих ділянок кожної із стін топкової камери відносяться місця розташування пальників, амбразур, технічних лазів, зони шириною m поблизу кутів топки [2], де через взаємне затінення труб має місце понижене тепло сприйняття труб і, як наслідок, порушення циркуляції в них. Тому рекомендується параметр m вибирати в діапазоні від 0,15 до 0,25 м.

Кутовий коефіцієнт екрану χ представляє собою відношення теплового потоку, що падає безпосередньо на труби екрану, до всього теплового потоку, направлено з ядра факела на стіну. Кутовий коефіцієнт визначається для кожного екрану за номограмою на рис. 2.4 [2]. Для вікна фестону $\chi_{\text{вф}} = 1$.

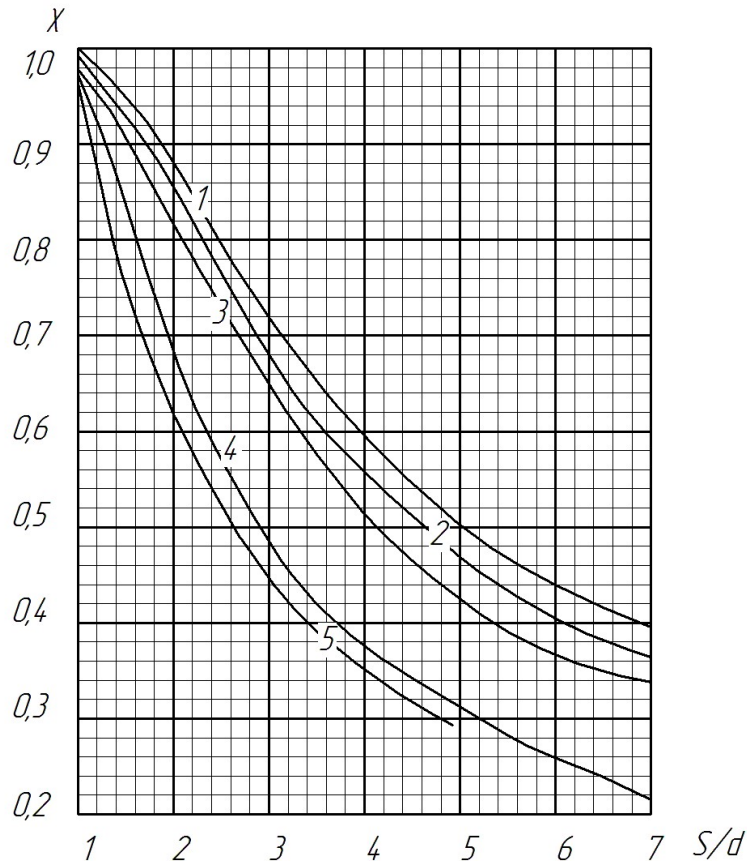


Рис. 2.6 – Кутовий коефіцієнт екрану [2, 4]:

- 1 – 3 урахуванням випромінювання обмуровки при $e \geq 1,4d$;
 2 – те ж при $e = 0,8d$; 3 – те ж при $e = 0,5d$;
 4 – те ж при $e = 0$; 5 – без урахування випромінювання обмурівки

e – відстань від вісі труб екранів до стінки приймається в діапазоні від 0,05 до 0,1 м.

Коефіцієнт теплової ефективності екранів:

$$\Psi = \frac{(F_{\text{фр}}^{\text{ек}} \cdot \chi_{\text{фр}} + 2F_6^{\text{ек}} \cdot \chi_6 + F_3^{\text{ек}} \cdot \chi_3) \xi_{\text{ек}} + (F_{\text{вф}}^{\text{ек}} \cdot \chi_{\text{вф}}) (\xi_{\text{ек}} + \beta)}{F_{\text{ст}}}$$

де β – коефіцієнт, що враховує взаємний теплообмін між топкою та поверхнею нагріву, що розташована за топкою. При розташуванні за вікном топки ширм коефіцієнт β приймається рівним 0,6 при спалюванні твердого палива і 0,8 при спалюванні газу або мазуту; при розташуванні за вікном фестона – $\beta = 0,9$, котельного пучка – $\beta = 1,0$.

Ефективна товщина випромінюючого шару:

$$S = 3,6 \frac{v_T^{min}}{F_{ст}}, \text{ м}$$

2.3.3 Розрахунок теплообміну в топці.

Для здійснення розрахунку потрібно задатися температурою продуктів згорання на виході з топки ϑ_T'' , °С.

Теплота що вноситься в топку з повітрям:

$$Q_{пов} = (\alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пс})h_{гп}^0 + (\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{пс})h_{хп}^0, \text{ кДж/м}^3 \text{ або кДж/кг}$$

де $h_{гп}^0$ – ентальпія гарячого повітря, кДж/м³ (кДж/кг).

$h_{хп}^0$ – ентальпія холодного повітря, кДж/м³ (кДж/кг).

$\Delta\alpha_{пс}$ – присмок повітря (в топці котла відсутній).

Корисне тепловиділення в топці:

$$Q_T = \frac{Q_p^p(100-q_3-q_4-q_5)}{100-q_4} + Q_{пов}, \text{ кДж/м}^3 \text{ або кДж/кг}$$

Адіабатична температура горіння палива ϑ_a – це умовна температура, до якої нагріваються продукти згорання за умов, що все тепло в топці йде на нагрівання продуктів згорання й відсутня дисоціація. ϑ_a визначається за h - T таблицею для топки при $h = Q_T$ $I = Q_m$. Адіабатична температура в Кельвінах $T_a = \vartheta_a + 273$, К.

Середня сумарна теплоємність продуктів згорання:

$$\overline{(vc)} = \frac{Q_T - (h_T)''}{\vartheta_a - \vartheta_T''}, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{°С)} \text{ або кДж/(кг} \cdot \text{°С)}$$

де $(h_T)''$ – ентальпія продуктів згорання на виході з топки, кДж/м³ (кДж/кг); визначається за h - T таблицею для топки при ϑ_T'' .

Коефіцієнт поглинання променів газовою фазою продуктів згорання:

$$k_r = \left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{\sqrt{10P \cdot r_{\Pi} \cdot S}} - 1 \right) \left(1 - \frac{0,37T''_T}{1000} \right) \cdot r_{\Pi}, \quad \frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$$

де P – тиск у топковій камері, МПа; для розрахунку приймається $P=0,1013$ МПа.

Коефіцієнт поглинання променів часточками сажі:

$$k_c = \frac{1,2}{1 + \alpha_T^2} \left(0,12 \sum \frac{m}{n} C_m H_n \right)^{0,4} (1,6 \cdot 10^{-3} T''_T - 0,5), \quad \frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$$

Сумарний коефіцієнт послаблення променів для газу та мазуту:

$$k = k_r + m k_c, \quad \frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$$

де m – коефіцієнт, що характеризує заповнення топкової камери полум'ям, що світиться (часточками сажі). При спалюванні мазуту в газощільних котлах $m=0,3$; для не газощільних котлів – $m=0,6$. При спалюванні природного газу $m=0,1$. До уточнення, це ж саме значення приймається і для інших газів, окрім доменного, для якого $m=0$.

Основною радіаційною характеристикою продуктів згорання слугує критерій поглинальної здатності (критерій Бугера), який характеризує послаблення теплового випромінювання в топковому об'ємі за рахунок його поглинання або розсіювання трьохатомними газами, часточками сажі, летючої золи, коксу:

$$Bu = k \cdot S \cdot P$$

Ефективне значення критерію Бугера:

$$\widetilde{Bu} = 1,6 \ln \left(\frac{1,4Bu^2 + Bu + 2}{1,4Bu^2 - Bu + 2} \right)$$

Критерій радіаційного теплообміну (критерій Больцмана), який представляє собою відношення між тепловмістом продуктів згорання і тепловим потоком на екрани топки:

$$Bo = \frac{\varphi \cdot B_p \cdot \overline{(\vartheta c)}}{5,67 \cdot 10^{-11} \overline{\Psi} \cdot F_{\text{ст}} T_a^3}$$

Параметр, що враховує вплив на інтенсивність теплообміну відносного рівня розташування пальників, ступеня забаластування топкових газів та інших факторів:

$$M = 0,4 \left(1 - 0,4 \frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{т}}} \right) \sqrt[3]{r_v}$$

де $h_{\text{п}}$ – висота розташування пальників, м; $h_{\text{т}}$ – висота топки, м; r_v – параметр забаластування топкових газів:

$$r_v = \frac{V_{\text{п}}}{V_{N_2}^0 + V_{RO_2}^0}, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Дійсна температура на виході з топки:

$$\vartheta_{\text{т}}'' = \frac{T_a}{1 + M \cdot \widetilde{Bu}^{0,3} \left(\frac{1}{Bo} \right)^{0,6}} - 273, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Розрахована температура на виході з топки $\vartheta_{\text{т}}''$ знаходиться в проміжку $\pm 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ від попередньо прийнятої $\vartheta_{\text{т}}''$. Якщо розрахована температура не вписується в заданий проміжок, необхідно задатися новою температурою $\vartheta_{\text{т}}''$ і повторити розрахунок.

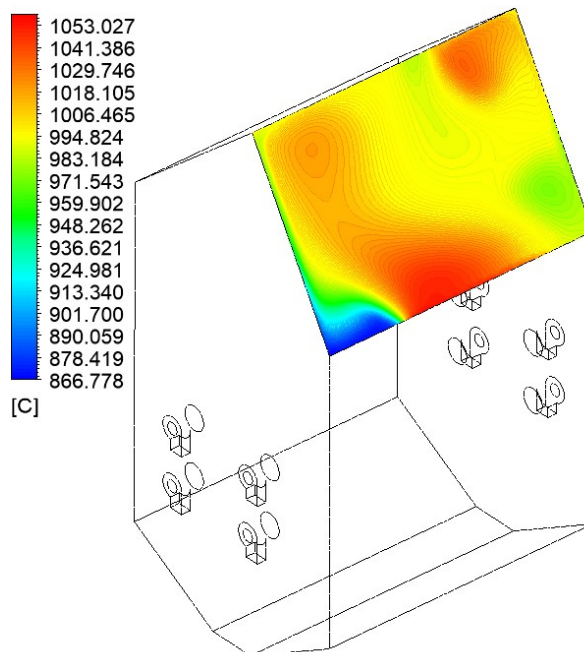


Рис. 2.7. – Результат CFD-модельовання температури на виході з топки

3 ВКАЗІВКИ ДО РОЗРОБКИ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ТОПКОВОЇ КАМЕРИ

Досить деталізовану геометрію топки котельного агрегату типу ГМ-50 екрановану трубами досить складно виконати засобами стандартного Design Modeler, засобами якого моделюють геометрію розрахункових об'єктів в комплексі програм ANSYS-CFX. Тому автор даного посібника рекомендує розробити тривимірну модель екранованої трубами топки котла в геометричному редакторі SolidWorks, а потім, через формат конвертувати модель в ANSYS.

3.4.1 Особливості комп'ютерного моделювання топкових екранів в програмі SolidWorks

Для створення моделі екрану, необхідно сформулювати ряд тривимірних ескізів труб, колекторів, барабана, елементи труб, що потім повторюються, розмножити за допомогою функції (масив).

Перед початком моделювання слід виконати розрахунки конструктивних розмірів топкової камери (п. 3.2.3). Накреслити ескіз згідно розрахованих довжин (рис. 3.1) і витіснити симетрично в обидва боки відносно центральної площини. Зберегти модель топки слід так, щоб в назві файлу не було символів кирилицею.

Згідно схеми екранування камери згоряння (рис. 3.2) створення моделей труб рекомендується виконувати за допомогою команд «бобышка по траектории», «ескіз» (мається на увазі двовірний ескіз) і «тривимірний ескіз». Використання двох перших команд продиктоване тим, що в даній тривимірній моделі топкового екрану частину підйомних труб мають порівняно просту конструкцію і при їх побудові можна використовувати функцію двовірного ескізу, а

частина труб, які огинають місця установки пальників необхідно будувати із застосуванням функції складного тривимірного ескізу.

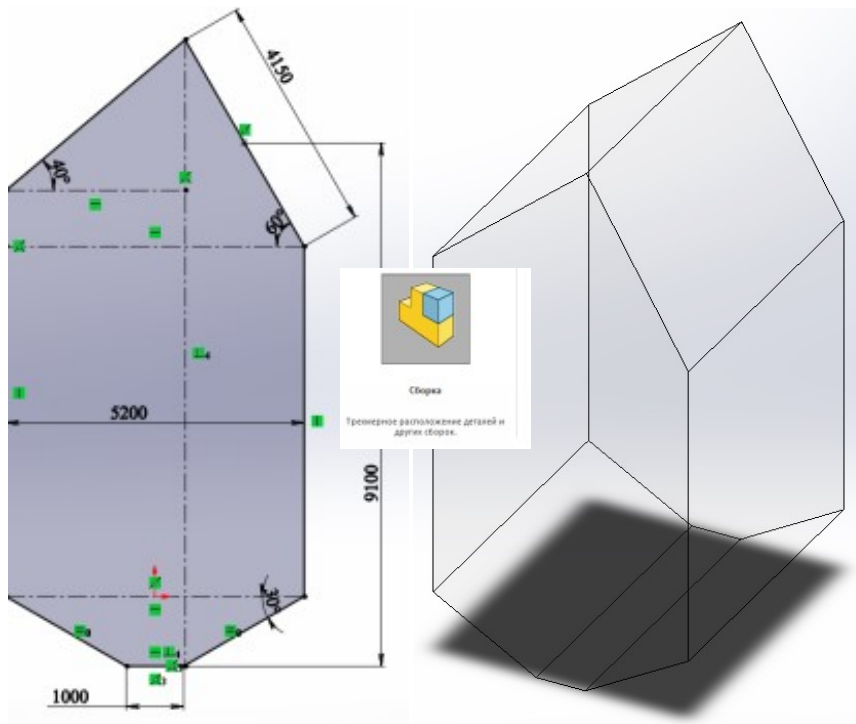


Рис. 3.1 – Тривимірна модель топки

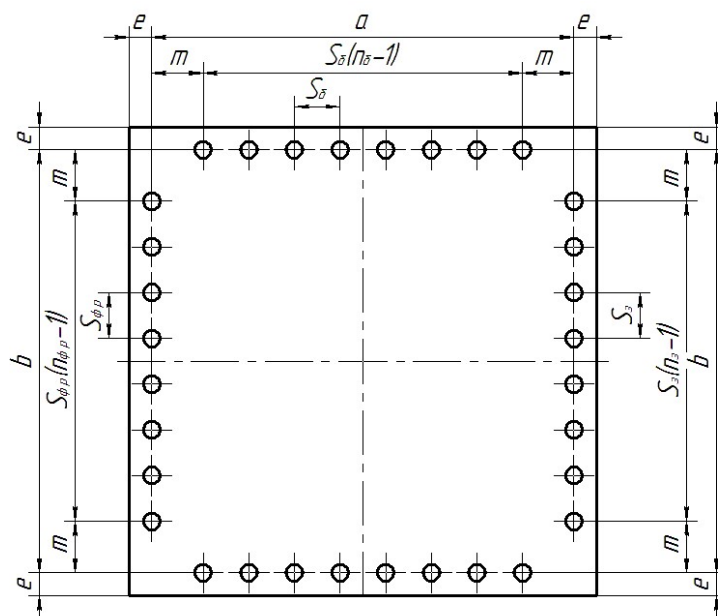


Рис. 3.2 – Екранування топки [2]

Спочатку слід побудувати масив труб довжиною від роздаючого колектора до переріз розміщення пальників.

Порядок побудови підйомної труби з двовимірним ескізом траєкторії можна представити в наступному вигляді:

- покажчиком миші (біля курсору з'являється відповідний знак паралелепіпеда), вказати на поперечну площину, що перетинає підйомну трубу (див. рис. 3.3), і накреслити ескіз траєкторії труби; Відповідне розташування отворів під підйомні і опускні труби обумовлене в першу чергу питаннями забезпечення міцності колектора. Отвори під підйомні труби розташовані під деяким кутом до горизонту і розташовані в три ряди так, щоб крок між трубами був рівний;

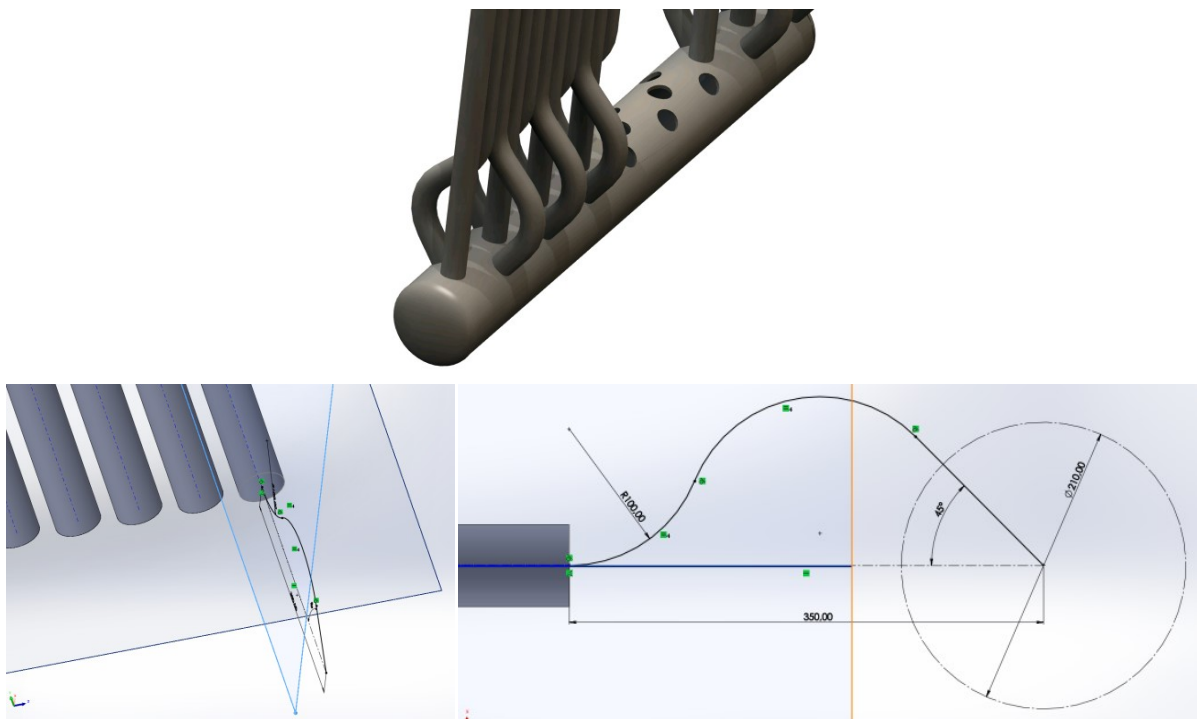


Рис. 3.3. Модель роздаючого колектора (а) і ескіз «зігнутої» труби (б)

- за допомогою команди «бобышка по траектории» шляхом об'єднання двох ескізів – ескізу траєкторії труби і ескізу її поперечного перерізу створити тривимірну модель труби екрану. Ескіз перерізу обов'язково повинен будуватися на площині

перпендикулярної ескізу траєкторії. Тому, використовується команда «Вставка»→ «Справочная геометрия»→ «Плоскость»→ «Угол», за допомогою якої можна створити площину, розгорнену на деякий кут щодо горизонту.

- трубу, що розташована поряд з гином, моделювати за допомогою витіснення перерізу по нормалі – «бобышка выдавить».

- наступну трубу, побудувати за представленою вище методикою, тільки ескіз траєкторії відобразити дзеркально до ескізу першої труби;

- Розмножити отримані три труби (рис. 3.4) за допомогою команди «линейный массив». Для цього в збірці необхідно викликати команду «Вставка»→ «Массив компонента»→ «линейный массив» і в полях «интервал» і «количество экземпляров» вказати крок і кількість труб.

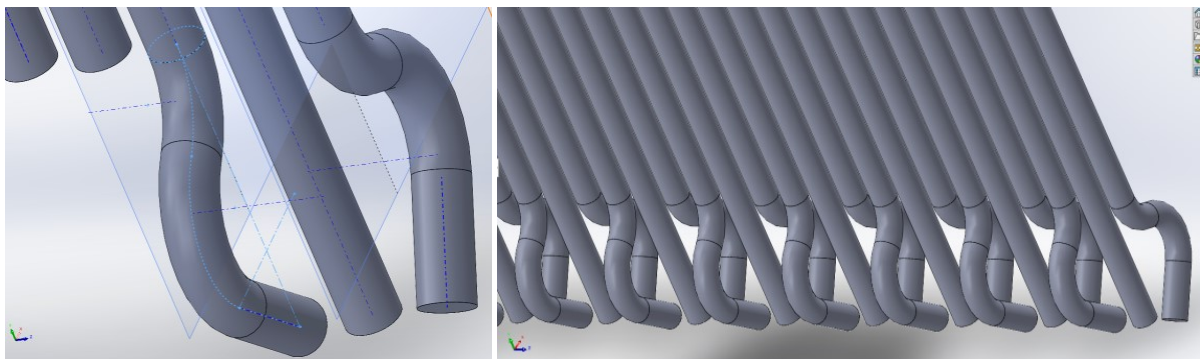


Рис. 3.4. Модель роздаючого колектора (а) і ескіз «зігнутої» труби (б)

- Зробити циліндричний виріз в масиві з труб під встановлення колектора (рис. 3.5). З цією метою, в ескізі однієї гнутої труби накреслити циліндричне коло діаметром 210 мм – зовнішній діаметр роздаючого колектора з відміткою «вспомогательная геометрия». Відобразити накреслений ескіз і на його основі створити новий – коло із взаємозв'язком «коррадиальность». З нього створити виріз «наскрізь» в обидва боки.

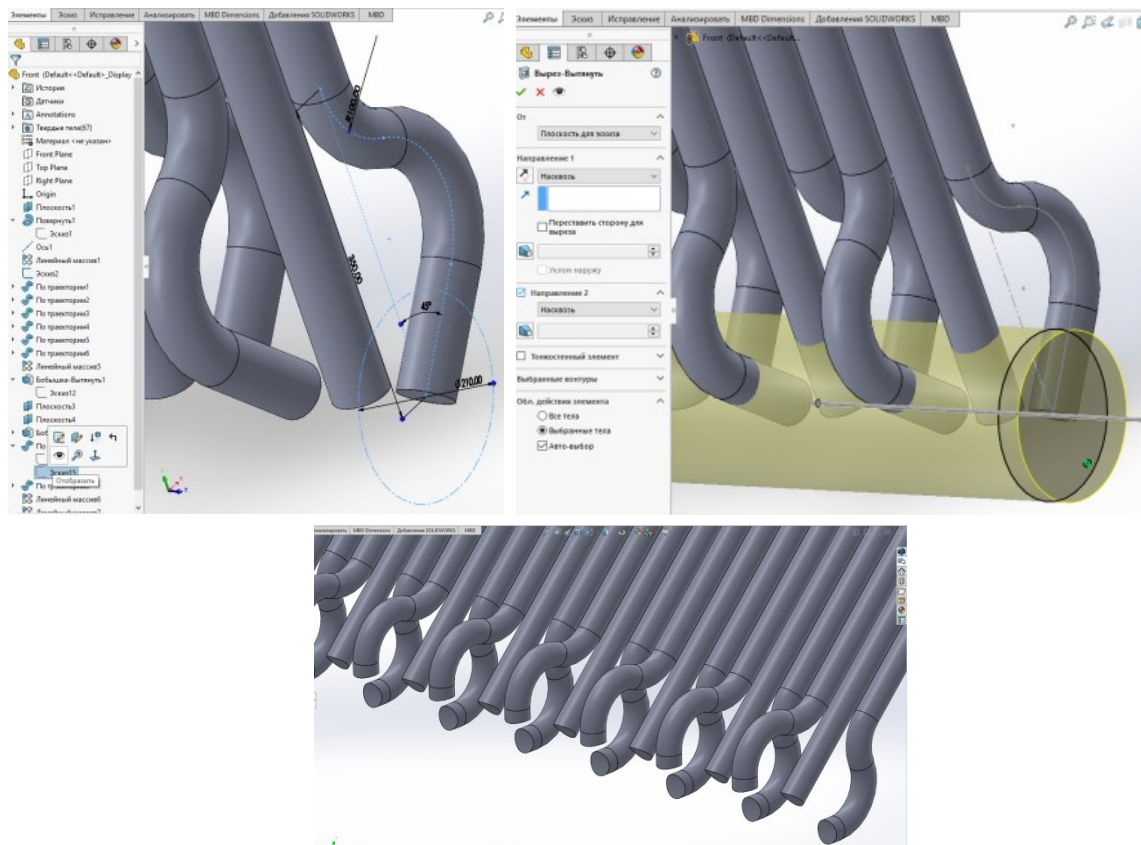


Рис. 3.5. – Модель масиву труб для з'єднання з циліндричним роздаючим колектором

Приступити до моделювання геометрично складних моделей підйомних труб за допомогою команди «трехмерный эскиз». Це труби розташовані поблизу місця розташування пальників (рис. 3.6). Методика побудови труби на основі тривимірних ескізів містить з наступні етапи:

- створити переріз труби діаметром d (п. 3.3.2);
- вибрати поперечну площину, на якій повинна знаходитися траєкторія труби. Це поперечна площина, яка проходить крізь центральну вісь однієї з труб, що знаходиться поблизу амбразури пальника (рис. 3.6);
- необхідно використати команду «трехмерный эскиз». Для цього необхідно завершити режим редагування двовимірної ескізу командою «перестроить» і, не відключаючи режиму «редактирования

детали», вибрати площину побудови траєкторії труби і запустити команду «трехмерный эскиз»;

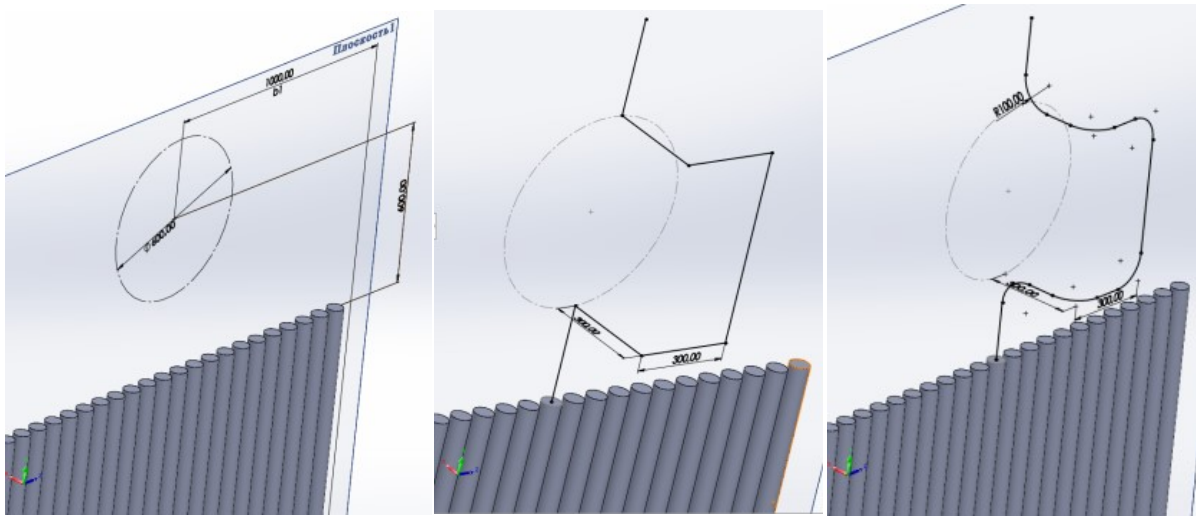


Рис. 3.6. – Ескіз першої труби, що огинає амбразуру пальника

- «грубо», з прямих ліній (за допомогою команди «лінія» меню «трехмерный эскиз»), без плавних вигинів і скруглень накреслити траєкторію труби в трьох декартових площинах. У тривимірному ескізі перемикання між двовимірними площинами здійснюється за допомогою клавіші на клавіатурі «ТАБ», при цьому біля курсору миші виникає позначення координатних осей декартової системи координат;

- командою «бобышка по траектории» створити тривимірну трубу (рис. 3.7);

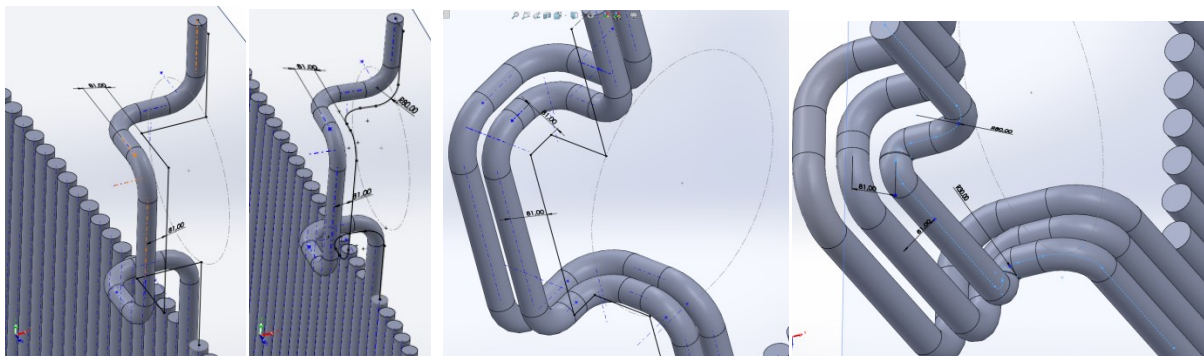


Рис. 3.7. – Ескіз першої труби, що огинає амбразуру пальника

- при моделюванні наступних труб врахувати, що їх ескізи розташовані через крок між трубами екрану s (п. 3.3.2);
- дзеркально відобразити накреслені труби (рис. 3.8), щоб створити модель труб, які огинають амбразуру пальника.

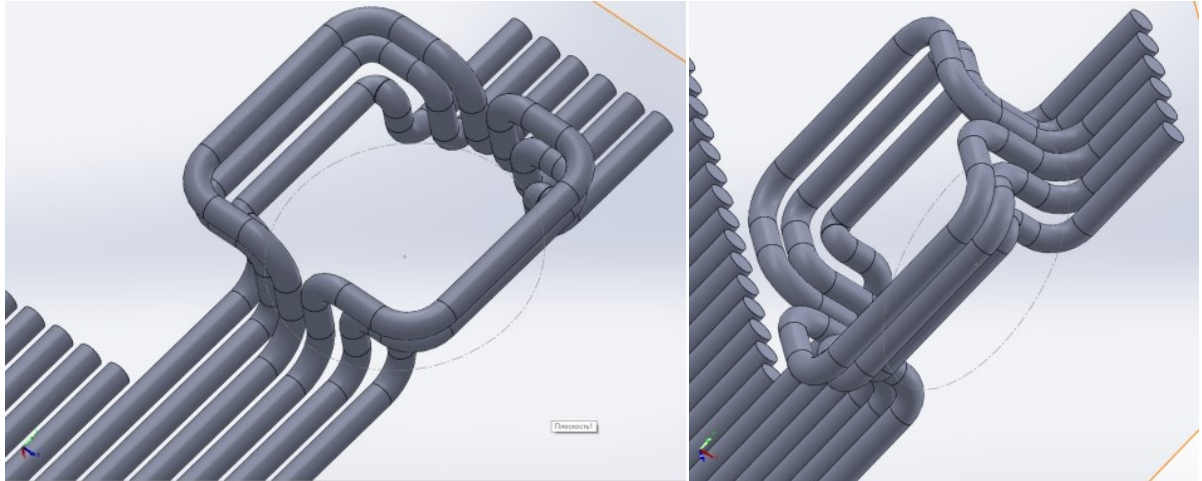


Рис. 3.8. – Труби, що огинають амбразуру пальника

В верхній частині топки, згідно описаної вище методики, накреслити з'єднання труб з верхнім роздаючим колектором (рис. 3.9).

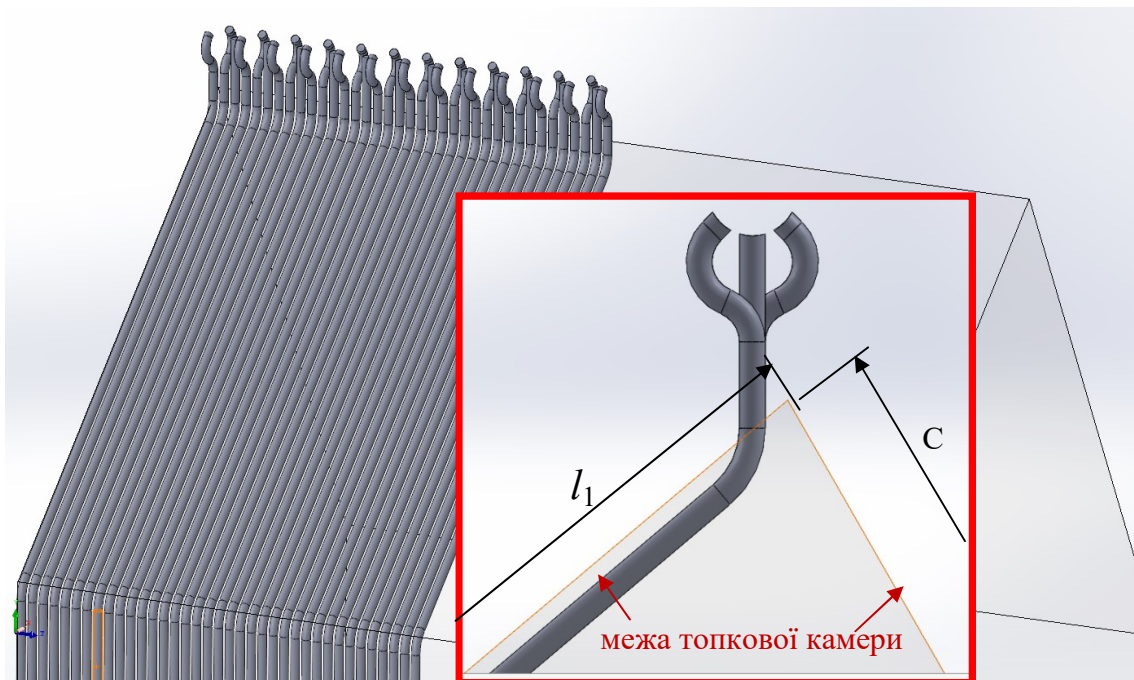


Рис. 3.9. – З'єднання труб з верхнім роздаючим колектором

В представленому прикладі, пальників чотири. При побудові екрану вважали, що площа, яка перетинає топкову камеру в центрі є площиною симетрії. Зробити дзеркальне відображення, щоб зберігалась відстань між пальниками b_1 (рис. 3.5) не вдасться, тому слід виділити тривимірні труби, що огинають амбразуру пальника і дев'ять труб з правого і лівого боку цих труб і створити лінійний масив (рис. 3.10). Цей масив можна зробити тільки у випадку якщо ввімкнено налаштування «тела», перерахувати необхідні для масиву труби вказівником миші і вказати напрямок розташування масиву, крок між елементами масиву і їх кількість. В представленому прикладі, крок між трубами становить 81 мм, тому майбутній масив містить два елементи (виділені синім кольором на рис. 3.10 двадцять чотири труби) з кроком між ними 2025 мм.

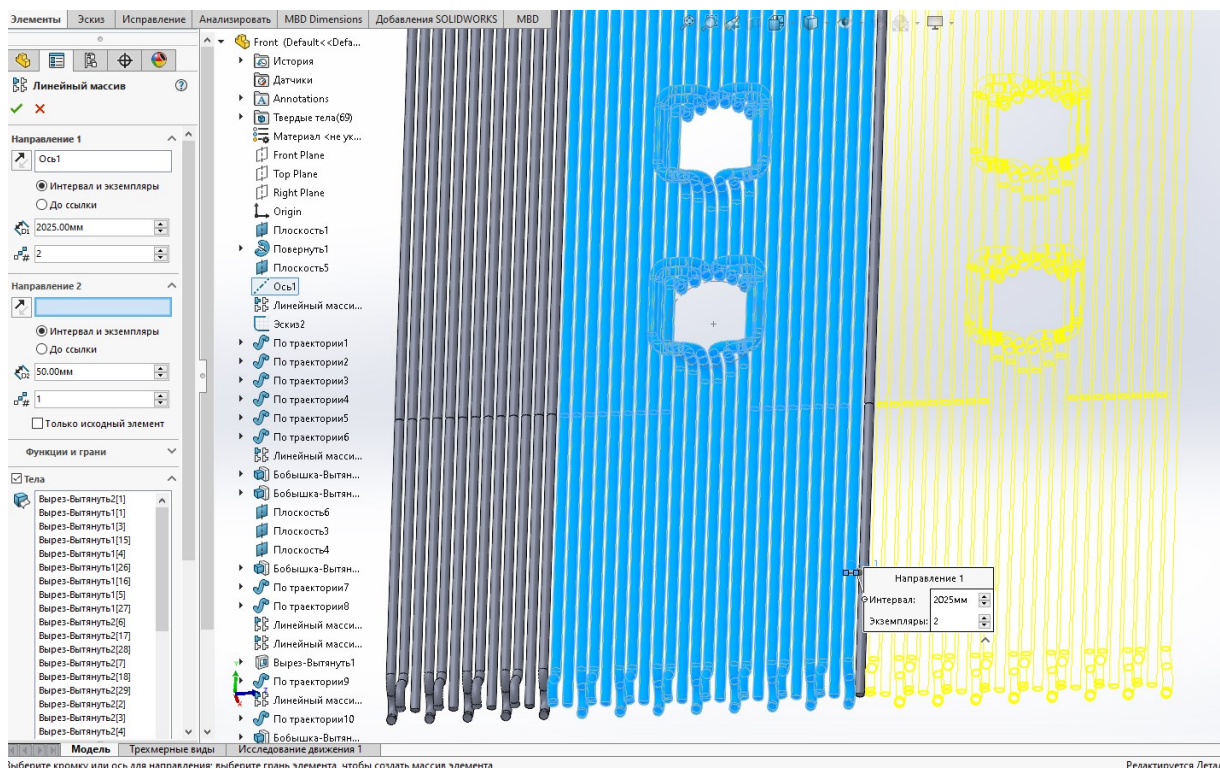


Рис. 3.10. – Налаштування масиву для створення екрану

В центральній частині топки, між двома масивами труб які виділені синім і жовтим кольором на рис. 3.10, знаходиться ще одна

труба. Її поперечна площа в якій будували траєкторію, співпадає з поперечною площиною топкової камери. Ця труба необхідна щоб екран з труб був суцільний, так як в представленому прикладі побудову масиву труб починали на площині, що розміщена на відстані 81 мм (що відповідає крокові між трубами екрану) від поперечної площини топкової камери. Завершити побудову фронтального екрану слід масивом з тринадцяти труб (виділені синім кольором на рис. 3.11), що знаходяться на периферії масиву (рис. 3.9) та верхнім і нижнім роздаючи ми колекторами.

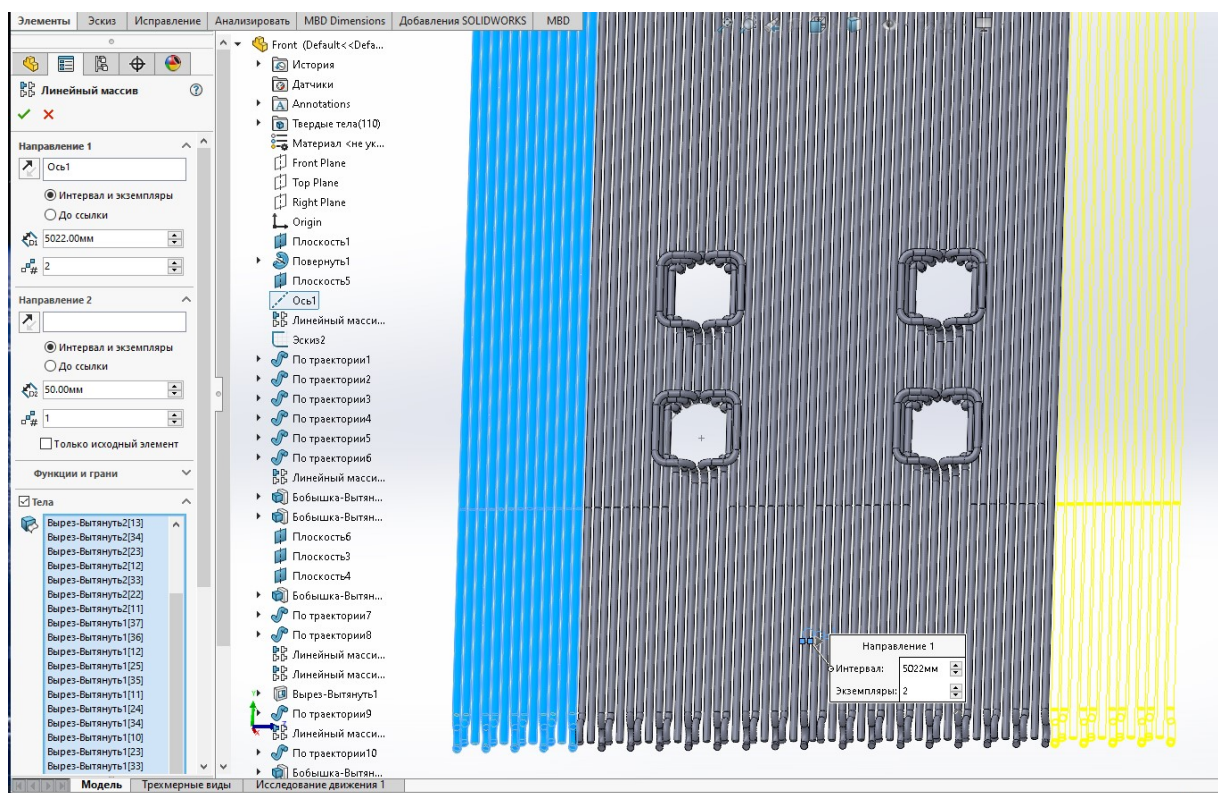




Рис. 3.11. – Налаштування масиву для створення екрану

Комп'ютерну модель роздаючого колектора слід зобразити у вигляді циліндричної труби з зовнішнім діаметром 210 мм, до торців якої приварені еліптичні денця. Для спрощення завдання взаємозв'язків в збірці слід коло діаметром 210 мм розташувати в тій же точці простору в якій робили виріз в трубах (рис. 3.5). Засобами

SolidWorks це можна зробити так: в збірці перейти за посиланням «Вставка → Компонент → Новая деталь». Біля курсору миші появиться знак ✓ – це система питає де буде розташований перший ескіз нової деталі. Вказати площину в якій робили виріз в трубах (рис. 3.5). Зробити видимим ескіз вирізу в трубах затиснувши на знак . Побудувати коло, витіснити його в обидва боки командою «бобышка выдавить». В цій деталі виділити торець колектора і командою «Купол»  еліптичне денце. Аналогічно, для верхнього роздаючого колектора (рис. 3.12). При збереженні файлів, їх назву слід формувати з латиниці.

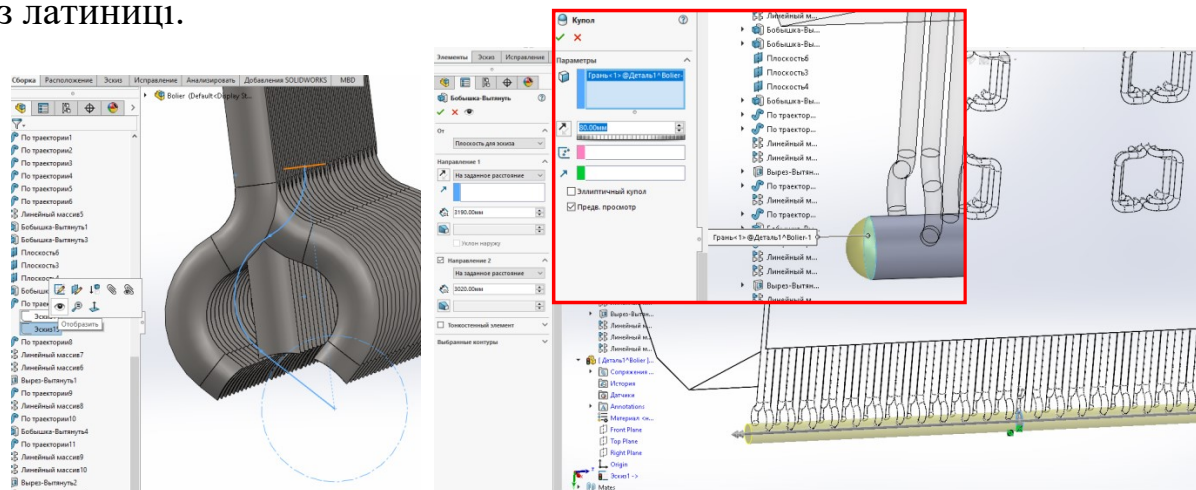


Рис. 3.12. – Моделювання роздаючого колектора

Моделювання бічних екранів відбувається аналогічно. Спочатку на бічній площині топкової камери потрібно накреслити ескіз траєкторії труби (рис. 3.13).

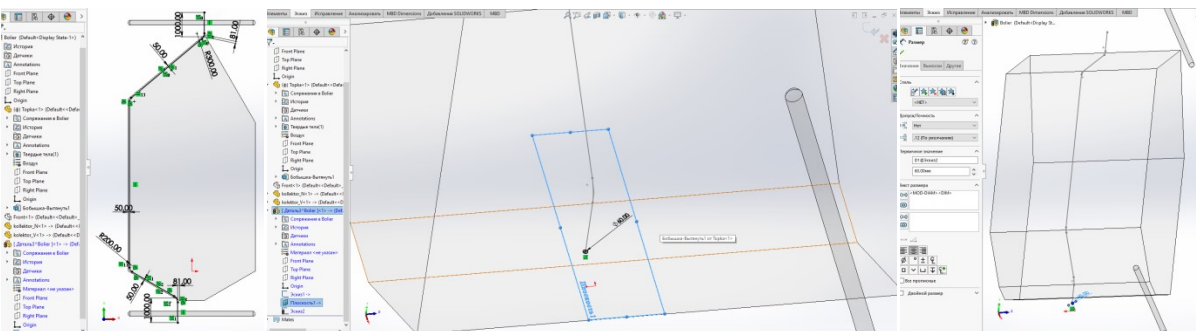


Рис. 3.13. – Моделювання труб бічного екрану

Далі, створити на додатковій площині, що паралельна поду котла переріз труби, та за допомогою команди «бобышка по траектории» створити тривимірну трубу, з якої побудувати масив труб, що складають бічний екран (рис. 3.14).

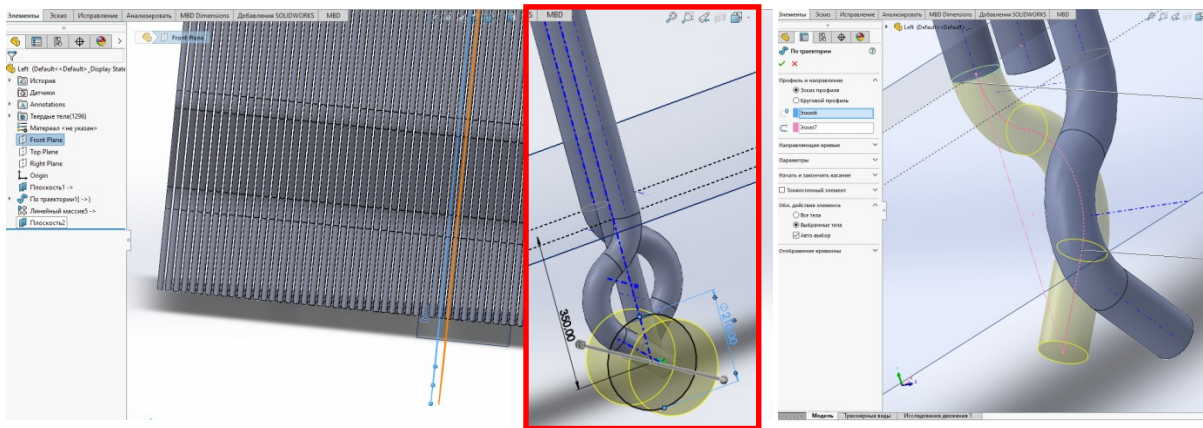



Рис. 3.14. – Моделювання роздаючого колектора для бічного екрану

Комп'ютерна модель колекторів бічного екрану будується за допомогою вище приведеної методики.

Для моделювання заднього екрану слід накреслити в режимі збірки створити нову деталь (Вставка → Компонент → Новая деталь) і в якості першого ескізу вибрати площину, що розташована в поперечному перерізі топки (так як у випадку бічного екрану). Відрізки, що формують траєкторію труби розміщені на відстані 50 мм від стінки топки, а відрізок який розміщений в області фестона знаходиться на відстані $50 + 81$ мм (де 81 мм – крок між трубами (рис. 3.15)). Це робиться так, щоб створити розташування труб в фестоні по сторонам рівностороннього трикутника. Далі потрібно виконати стандартні операції для створення лінійних масивів труб, гинів для з'єднання труб з верхнім і нижнім роздаючими колекторами.

Завершальним етапом є віддзеркалення (рис. 3.16) фронтального екрану відносно площини симетрії топки (команда  «Зеркальное отражение компонентов»).

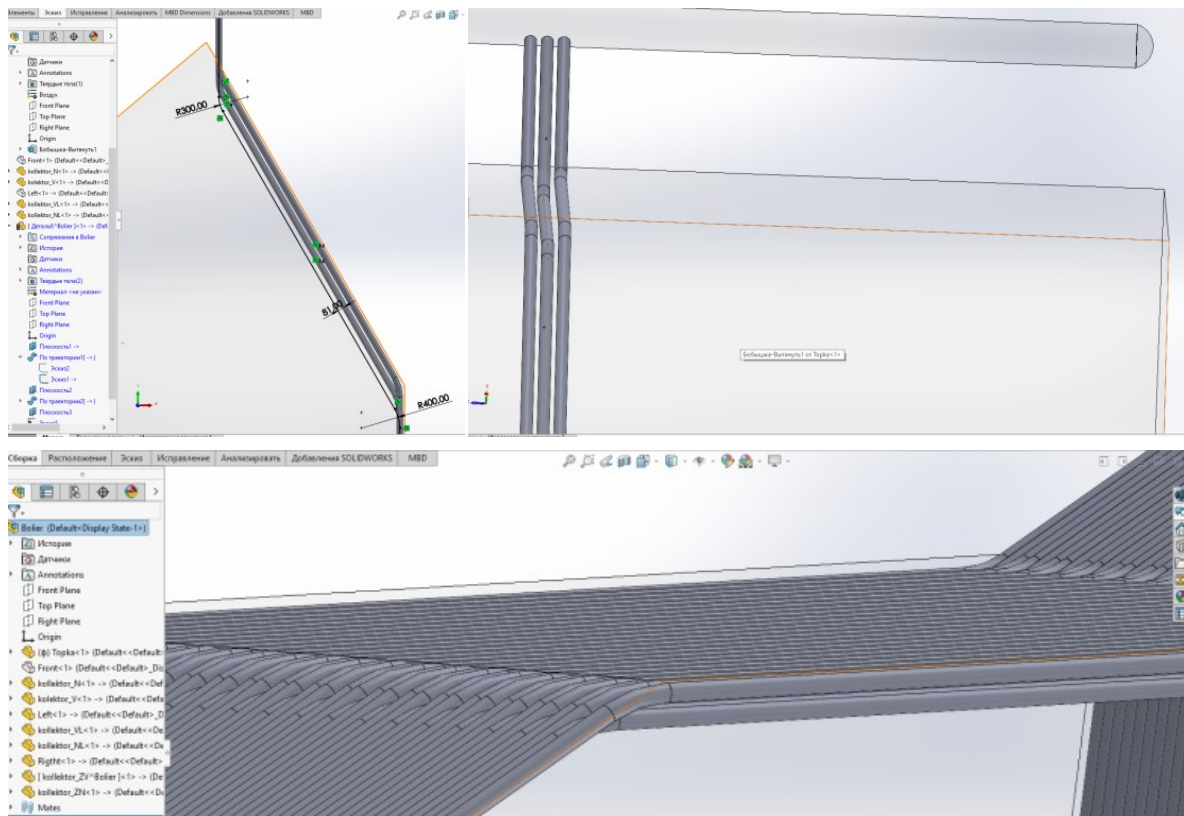


Рис. 3.15. – Моделювання фестону

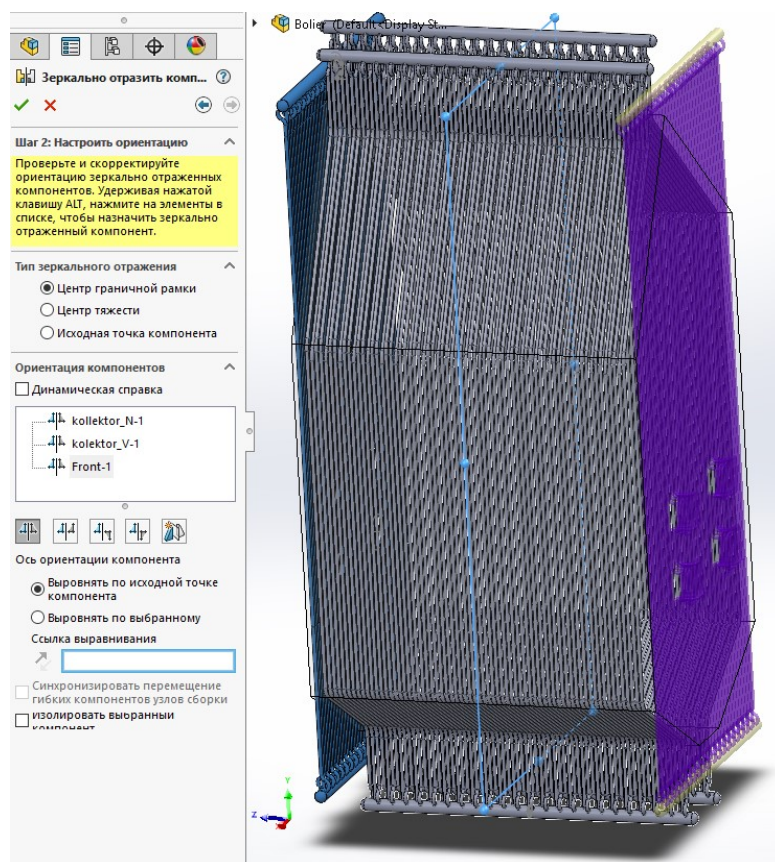
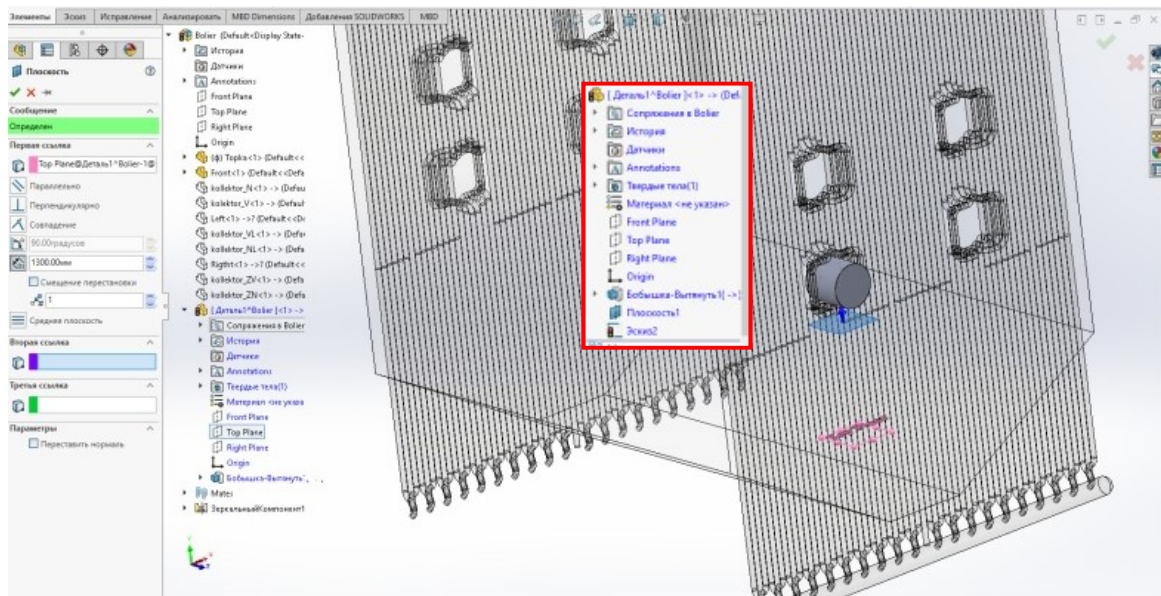


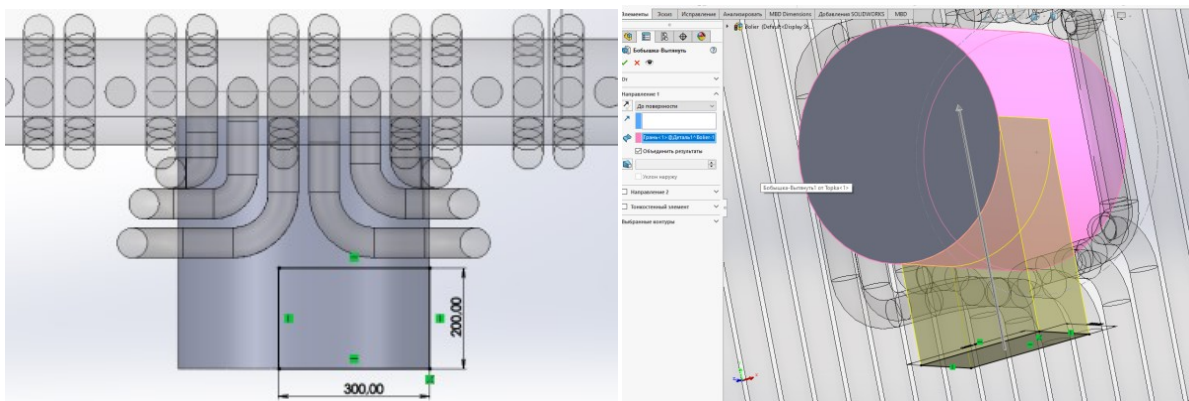
Рис. 3.16. – Дзеркальне відображення фронтального екрану

Для того щоб не виникло проблем при конвертації збірки в ANSYS потрібно на створеному «ЗеркальнийКомпонент1» натиснути праву кнопку миші в контекстному меню, що з'явиться, вибрати «Разбить зеркально отраженный компонент». Після цього в «Дереві конструювання» SolidWorks з'являться елементи відзеркаленого фронтального екрану, назви яких записані латинськими символами.

Щоб завершити модель, потрібно в амбразуру пальника розмістити модель вихорового пальника, яку слід зобразити в спрощеному вигляді, але так, щоб забезпечити тангенційне введення повітря в пальник (рис. 3.17).



а)



б)

Рис. 3.17. – Місце розташування (а) та модель вихорового пальника

В представленому прикладі, пальники розміщуються на зустріч один одному. Тому для моделювання використовується дзеркальне відображення пальників відносно площини симетрії (рис. 3.18).

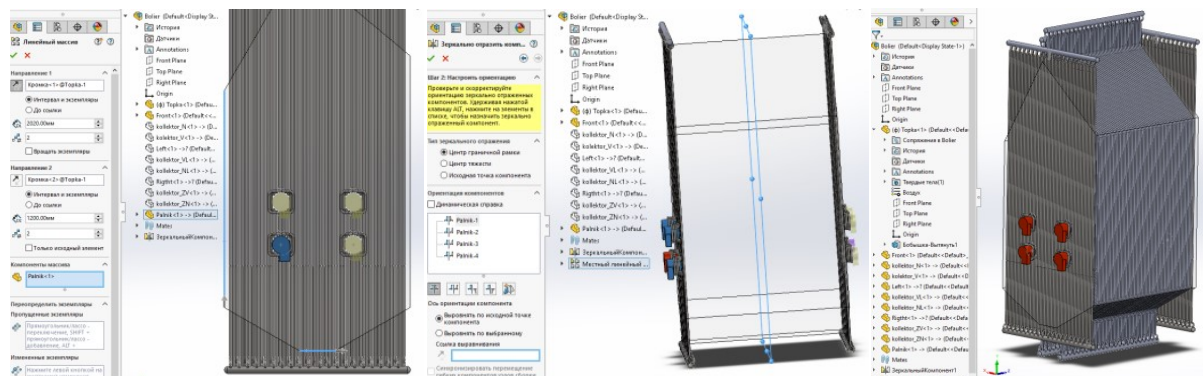


Рис. 3.18. – Послідовність зустрічного розташування пальників в моделі

При моделюванні течії і теплообміну використовується модель внутрішнього об'єму топки (рис. 3.1) та пальників (рис. 3.18). Інші поверхні нагріву використовуються для розробки конструкторської документації топкової камери. Для того щоб конструкторська документація до топкової камери мала завершений вигляд в окремій деталі накреслити модель топкової камери із стінами і додати її в загальну збірку (рис. 3.19).

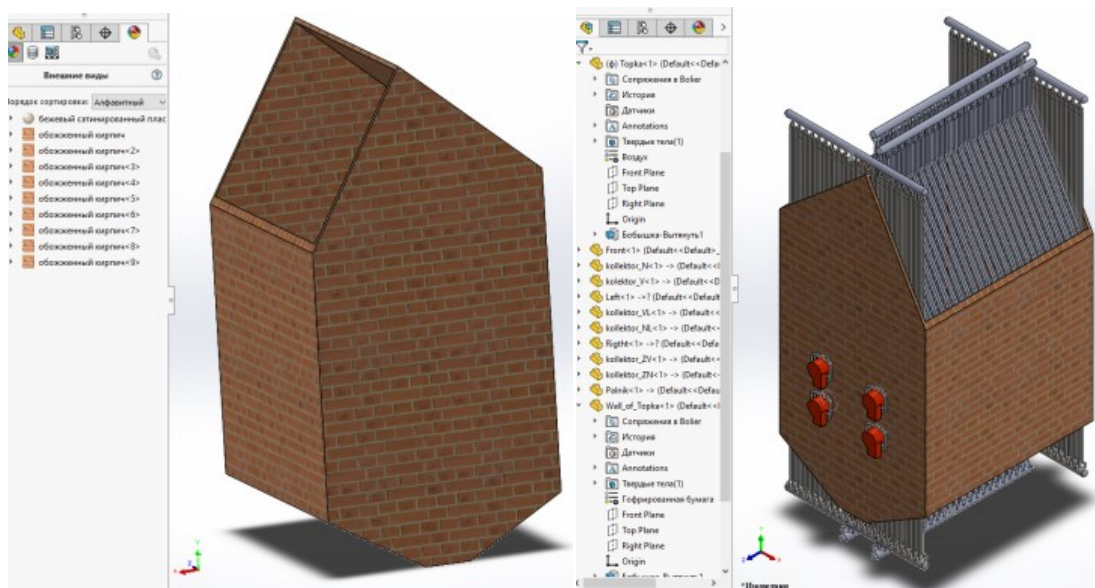



Рис. 3.19. – Зовнішній вигляд моделі котла ГМ-50

При створенні моделі стін топкової камери рекомендується переіменувати файл, в якому зроблена модель потоку в середині топкової камери (рис. 3.1). Відкривши цей файл слід вибрати команду «Оболочка» і вказати мишею одну тільки грань – «вікно» фестону. В налаштуваннях команди «Оболочка» вибрати пункт «Оболочка наружу» і вказати товщини стін топкової камери. Для естетичного вигляду стін топкової камери слід застосувати текстури граней .

При перенесення деталі «стіни топкової камери» в загальну збірку, при створення взаємозв'язків вибрати спів падіння трьох декартових площин топкового об'єму і об'єму стін топки.

Таким чином в даному розділі показано як розробити отримано тривимірну модель топки котельного агрегату ГМ-50 з зустрічним розташуванням пальників. Завершальним етапом при виконанні курсової роботи є розробка складального кресленика з розробленої моделі.

4 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ CDF-МОДЕЛЮВАННЯ ТОПКОВОЇ КАМЕРИ

4.1 Стислі теоретичні відомості

Матеріал даного розділу містить відомості про можливості застосування хімічної моделі скінченної інтенсивності (finite-rate chemistry model) в середовищі CFX для моделювання процесу горіння. Згоряння буде моделюватися з використанням загального однокрокового механізму реакції (one-step reaction mechanism), яка буде визначатися стехіометричними коефіцієнтами, ентальпіями реагентів і параметрами, від яких залежить ступінь реакції. Ступінь реакції визначається з допущення, що турбулентне перемішування реагентів є фактором, який обмежує швидкість реакції. Турбулентно-хімічна взаємодія (turbulence-chemistry interaction) моделюється з використанням моделі вихорової дисипації (eddy-dissipation model).

Моделювати реакцію можна або з використанням моделі перенесення реагентів (species transport model), або з використанням моделі горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model).

8.1.2 Керуючі рівняння.

Основні рівняння для збереження двовимірного дифузійного полум'я в газі можна записати в Декартовій ($n = 0$, $r = y$), або циліндричній системі координат ($n = 1$) [5].

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v) = 0 \quad (4)$$

Рівняння руху в напрямку вісі X:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v u) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r^n \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} - \rho x \quad (5)$$

Рівняння руху в напрямку вісі r :

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v^2) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r^n \frac{\partial v}{\partial r} \right) - n \frac{\mu v}{r^2} - \frac{\partial P}{\partial r} \quad (6)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v h) = \frac{\partial \dot{q}''}{\partial x} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \dot{q}'') + \dot{q}_c''' + \dot{q}_r''' \quad (7)$$

Рівняння збереження компонентів суміші:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_i) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v Y_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_i r^n \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + \dot{m}_i''' \quad (8)$$

Рівняння (8) дублюється для палива, окислювача і продуктів хімічної реакції.

Вважається, що сила тяжіння направлена протилежно вісі Ox . Густина теплового потоку \dot{q}'' визначається за допомогою рівняння:

$$\dot{q}'' = -\frac{\lambda}{C_p} \nabla h + \frac{\lambda}{C_p} \sum_{i=1}^k (1 - Le) h_k \nabla Y_k \quad (9)$$

де Y_k – масова доля k -го компоненту, $Le = D/a$ – число Льюїса-Семенова, $a = \lambda/(\rho \cdot C_p)$ – коефіцієнт температуропровідності, λ – коефіцієнт теплопровідності.

Для газів, це число близько одиниці, тому

$$\dot{q}'' = -\frac{\lambda}{C_p} \nabla h \quad (9)$$

Символами \dot{q}_c''' і \dot{q}_r''' позначають об'ємну швидкість виділення теплоти при горінні і градієнт щільності потоку випромінювання.

Зв'язок між ентальпією h і температурою T виражається за допомогою співвідношення:

$$h = \int C_p dT$$

Де для суміші з n компонентів

$$C_p = \sum_{i=1}^n Y_i C_{p,i}$$

Якщо уявити, що всі компоненти суміші ідеальні гази, то для них справедливим є рівняння стану:

$$P = \rho RT; R = \sum_{i=1}^n Y_i R_i; \sum_{i=1}^n Y_i = 1 \quad (10)$$

Щоб визначити розподіл масових долей для кожного з n компонентів $Y_i(x,r)$ необхідно вирішити тільки $(n-1)$ переносу компонентів суміші, так як масову долю компонентів суміші n -го компоненту можна визначити за допомогою рівняння

$$\sum_{i=1}^n Y_i = 1$$

Таким чином, оскільки параметри \dot{m}_i''' , \dot{q}_c''' і \dot{q}_r''' можна визначити через інші фізичні змінні, потрібно визначити $n + 7$ невідомих, а саме

$$u, v, \rho, h, T, Y_1, Y_2, \dots, Y_n$$

Теоретичні відомості щодо процесу згоряння газів докладно висвітлені у монографії [4, с. 5-32, с. 59-69].

4.2 Корегування моделі топкової камери розробленої в SolidWorks для роботи в середовищі CFX

Розроблену засобами SolidWorks або Inventor тривимірну модель топкової камери з пальниками після конвертації слід доопрацювати засобами DesignModeler.

Якщо при моделюванні використовувався SolidWorks, то модель збірки (рис. 4.1, а) при конвертації в «старішу версію» ANSYS слід зберегти в форматі «*.x_t» (Parasolid). Якщо використовувався

Inventor – в форматі «*.sat». Коли версії SolidWorks і Inventor збігаються – то проміжний формат можна не використовувати.

Для того, щоб була можливість задати аксіальне впорскування газу в пальник, потрібно на фронтальній його поверхні накреслити двовимірну площину у вигляді кола. Ця двовимірна площина і буде пальнику використана у якості граничних умов для моделювання впорскування газу в пальник. Для її створення потрібно на фронтальній поверхні пальника створити двовимірну площину (рис. 7.2). На цій площині за допомогою команди Create → Surface from Sketch створити ескіз кола діаметром, наприклад 250 мм.

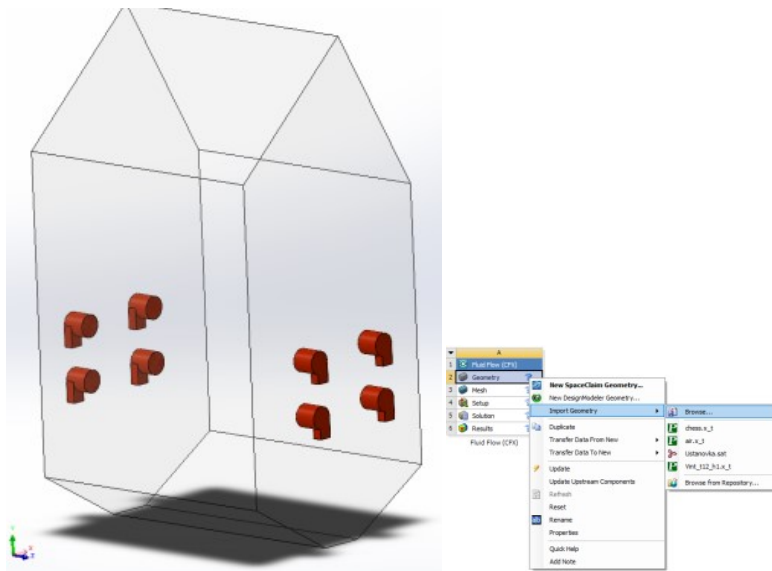


Рис. 4.1. – Зовнішній вигляд моделі котла ГМ-50 для моделювання засобами CFX

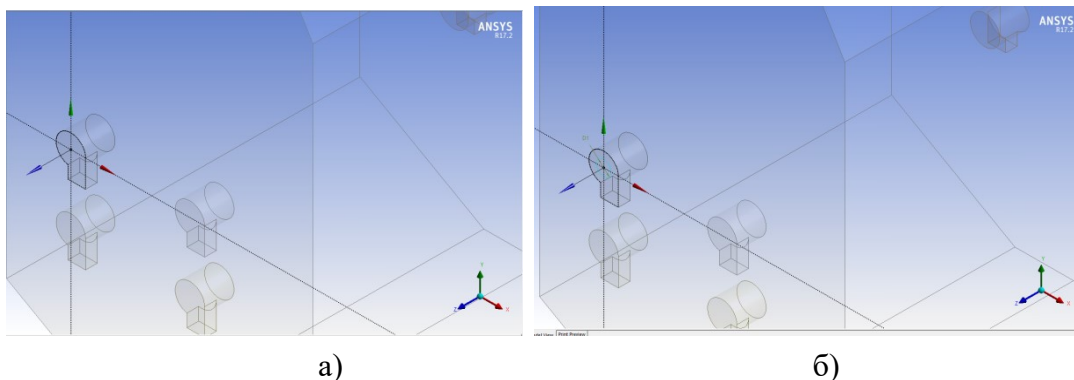


Рис. 4.2. – Створення двовимірної робочої площини на фронтальній поверхні пальника (а) та двовимірного кола діаметром 250 мм (б) для створення граничних умов

Ці операції потрібно повторити стільки разів, скільки пальників розташовано на стінах топки. Для того щоб не було проблем при завданні взаємозв'язків між скінчено-елементними сітками двовимірної площини, що символізує граничну умову впорскування газу, пальників та топкової камери слід об'єднати перераховані об'єми в один за допомогою команди Create New Part (викликається, якщо попередньо виділити всі перераховані вище об'єми і натиснути праву кнопку миші (рис. 4.3)).

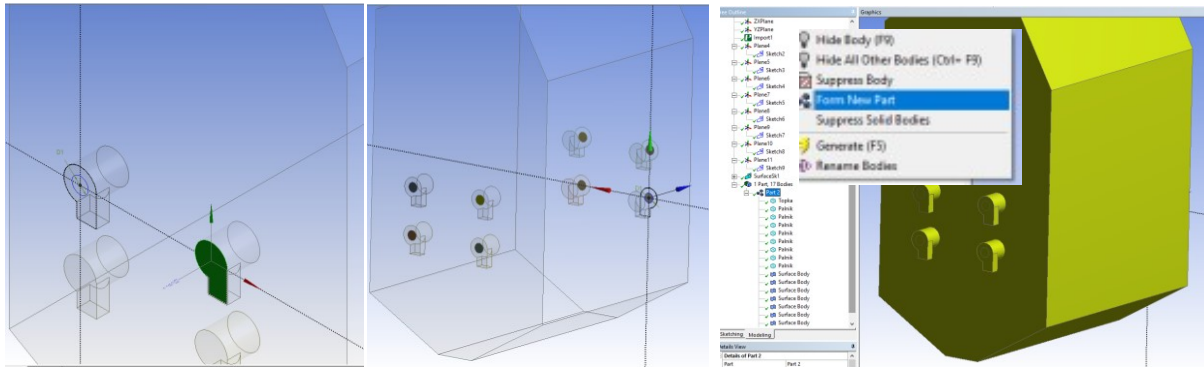


Рис. 4.3. – Об'єднання розмежованих розрахункових об'ємів в один

4.3 Порядок моделювання спалювання газів засобами CFX

При створенні скінчено-елементної сітки, слід досягти найменших відстаней між вузлами скінченого елемента в формі тетраедра. Ніякий інший елемент не здатен апроксимувати розрахункову область пальника. Допускається завдання різної щільності розрахункової сітки для пальника і топкової камери (права кнопка миші на меню Mesh → Insert → Size).

Далі слід провести запуск пакету CFX і після успішного читання скінчено-різницевої сітки необхідно застосувати бібліотеку RIF. Для цього:

- 1) Натиснути праву кнопку миші на теці Reactions → Insert → CFX-RIF (рис. 4.4). В випадаючому вікні CFX Flamelet Generator в строчці Library File вручну дописати Ansys Lib.fl1. Після цього

розкрити теку Reactions, вибрати CFX-RIF, натиснути праву кнопку миші і активізувати бібліотеку (Start CFX RIF Generation).

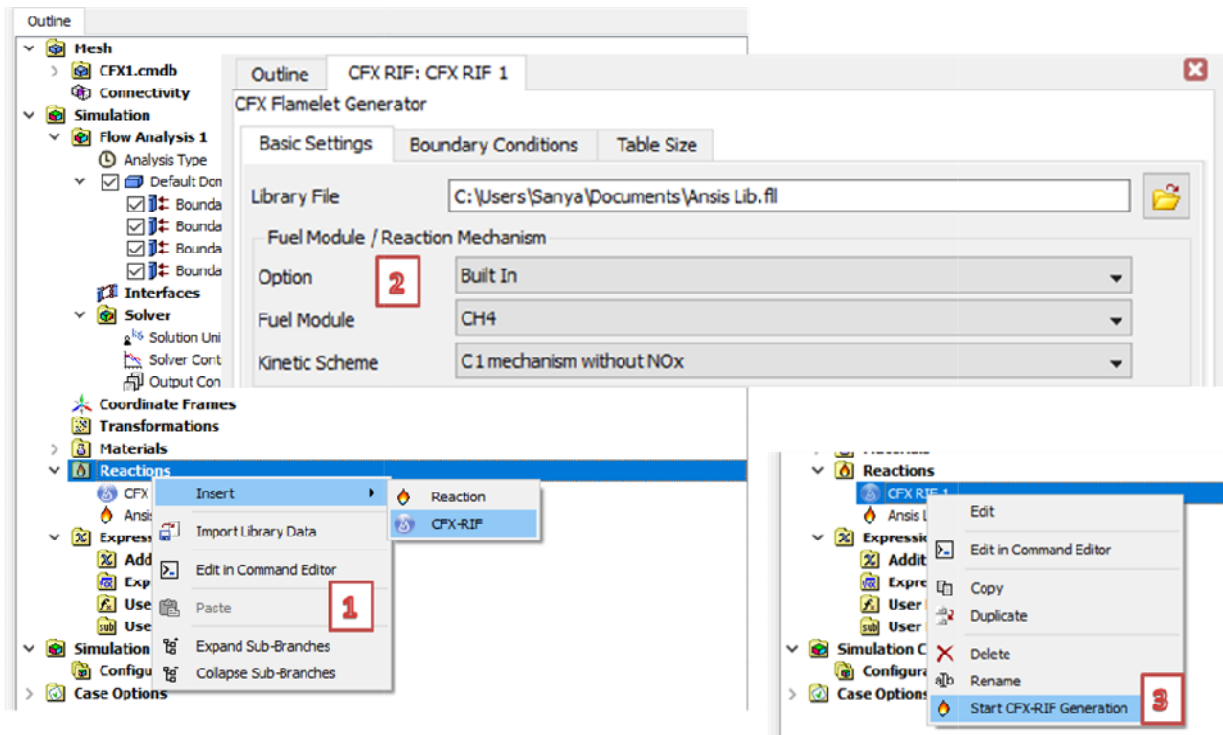


Рис. 4.4 – Послідовність налаштувань бібліотеки „CFX RIF”

2) Натиснути праву кнопку миші на теці Material і створити новий (Insert → Material). Вибрати групу, в якій він буде знаходитись (User) і проконтролювати, щоб система сама заповнила строку Reaction List (повинно бути записано Ansys Lib). Заповнити строку Thermodynamic State (вказати, що горить газ (рис. 4.5)). Відомо, всі властивості, за винятком густини розглядатимуться постійними. Використання постійних значень констант перенесення (в'язкості, теплопровідності, коефіцієнта масової дифузії (mass diffusion coefficients)) допустимо, оскільки течія повністю турбулентна. Параметри молекулярного перенесення (molecular transport properties) грають другорядну роль в порівнянні з турбулентним перенесенням. Питома теплоємність, навпаки, робить значний вплив на рішення, в цьому ви переконаєтеся надалі.

3) Виконати налаштування основних характеристик домену (Basic Settings), а саме вибрати в якості робочого тільки що створений матеріал. Потім перейти вкладку Fluid Model, підключити до розрахунку рівняння енергії, використати стандартну k-ε модель турбулентності і в групі команд Combustion вибрати PDF Flamelet.

4) Далі, необхідно задати граничні умови: вхід потоку газу, вхід повітря і вихід димових газів. Зовнішні сторони топкової камери вважати теплоізовльованими (на ці поверхні потрібно застосувати граничну умову Wall → Adiabatic). При завданні граничних умов на вході потоку з пальника в топку (рис. 7.5) стає доступним група команд Mixture де є можливість вибрати Fuel або Oxidizer.

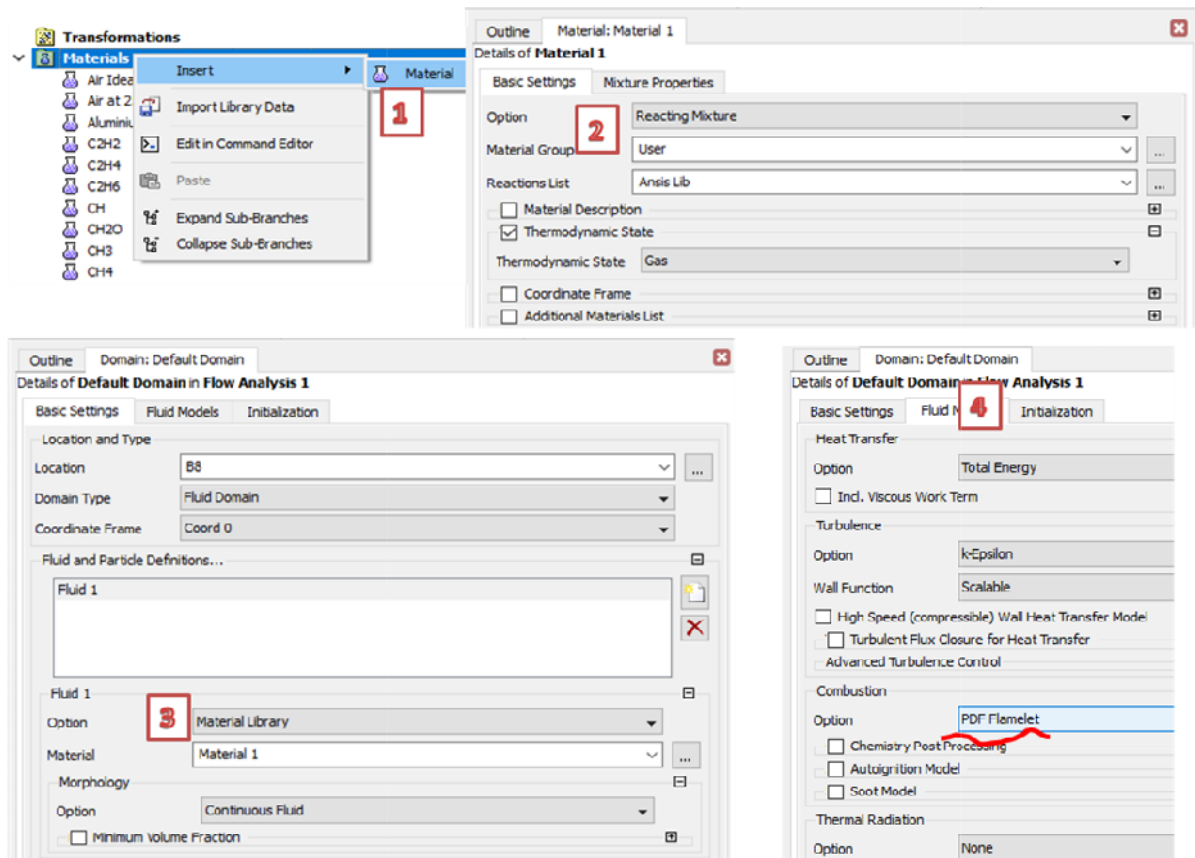


Рис. 4.5 – Налаштування розрахункового домену

5) Почніть розрахунок, вимагаючи 1000 ітерацій (Solve → Iterate...). Solve → Start Run.

б) В якості результатів розрахунку, потрібно зробити відображення розподілу статичної температури (рис. 6.6). Виберіть „Temperature...” і „Static Temperature” в списку „Contours of” (Розподіл) і натисніть „Display” (Відображення). Максимальне значення температури (рис. 4.6) складає порядка 3000 К. Реальнішого розподілу температур можна добитися, застосовуючи змінне значення теплоємності.

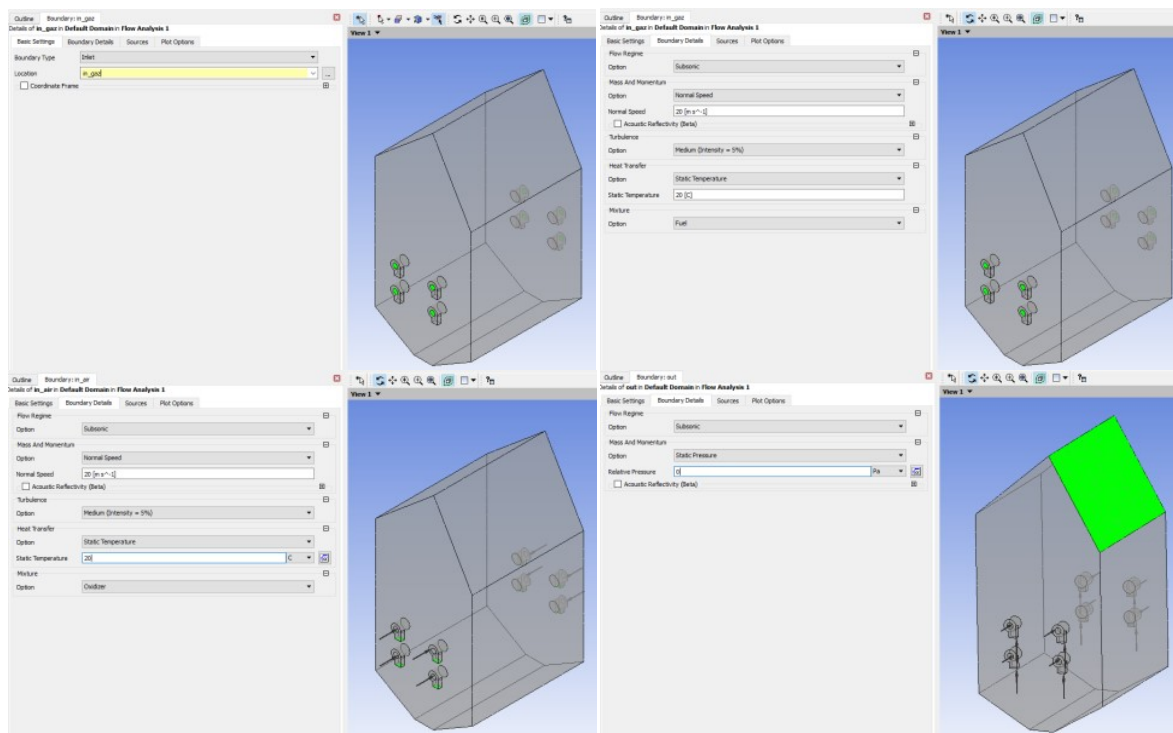


Рис. 4.6 – Завдання граничних умов

4.4 Аналіз отриманих результатів та порядок оформлення звіту


Звіт по проведеній роботі повинен містити результати розрахунку у вигляді векторних і контурних полів термодинамічних параметрів які розраховуються в розділі 2.

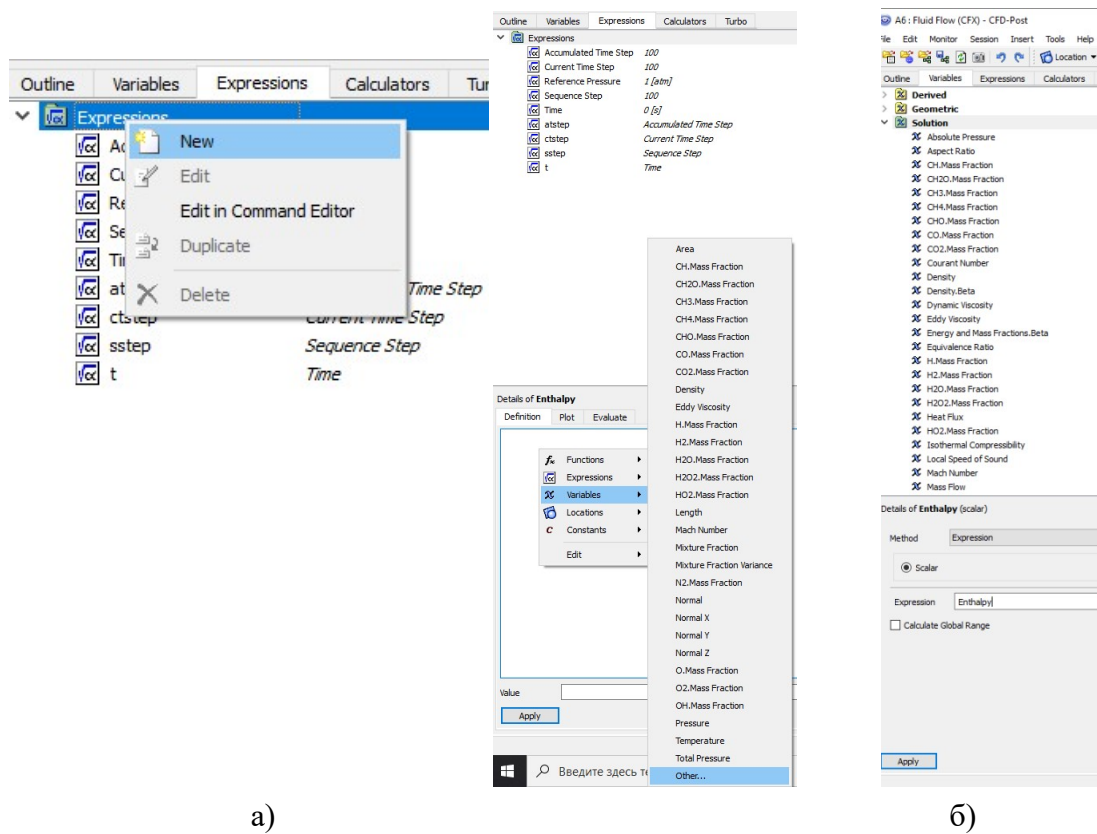
Структура розрахункової глави курсової роботи відповідає структурі розділу 2. Приведені формули повинні мати продовження у вигляді числових значень по заданому варіанту (табл. 1.1). Причому кожен розрахований потрібно порівнювати з результатами розрахунку засобами ANSYS-CFX.

У випадку, коли змінна серед списку змінних Post Processor ANSYS-CFX відсутня то її необхідно створити. Для цього потрібно перейти в меню Expressions, натиснути праву кнопку миші на папці Expressions і вибрати меню New (рис. 4.7а). Записати назву змінної, наприклад Enthalpy, і в меню Definition записати формулу розрахунку термодинамічного параметра (наприклад ентальпії) з використанням змінних, з яких вона складається. Для цього потрібно натиснути праву кнопку миші і вибрати пункт Variables де знайти необхідну змінну. Якщо її в випадному списку немає то вибрати її в повному списку змінних за допомогою натиснення на строку «other». Якщо потрібно набрати таким чином емпіричну формулу, то біля кожного коефіцієнта ставити в квадратних скобках розмірність.

Щоб стала можливість візуалізувати на площині розрахунок за допомогою цього виразу потрібно створити нову змінну – Variable (рис. 4.7б). Для цього перейти в меню Variables на папці Solution натиснути праву кнопку миші і вибрати меню New. Записати назву змінної і в випадному списку Expressions вибрати написану раніше формулу.

Після цього стає можливим в меню Contours візуалізувати розрахункову змінну вибравши її в пункті Variables.

За розрахунок посереднених по площі змінних (наприклад температура на виході з вікна фєстону, відповідає команда –  Function Calculator. Для її роботи потрібно вказати тип осереднення (Area Average), змінну і площину, де провести розрахунок.



а) б)

Рис. 4.7 – Послідовність створення нового розрахункового виразу (а) та присвоєння змінній розрахункового виразу (б)

Перелік посилань:

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) /Под ред. Н.В.Кузнецова, В.В.Митора, И.Е.Дубовского, И.С.Карасиной. Изд. Третье, перераб. и доп. – Санкт-Петербург: НПО ЦКТИ-ВТИ, СПб, 1998. – 256 с.
2. «Розрахунок топки» Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Парові котли» для студентів напряму підготовки 6.050604 «Енергомашинобудування» програми професійного спрямування «Котли та реактори» / Уклад.: В.О. Туз, В.І. Мариненко, О.О. Васечко – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 27с.
3. Конспект лекцій по дисципліні «Паливо та теорія горіння, спалюючі пристрої» для студентів денної форми навчання за напрямом 6.050601 «Теплоенергетика»/ Укл. Рижов А. П., — Дніпродзержинськ:ДДТУ, 2014.–96 с.
4. Методические указания к курсовому проекту парогенератора для студентов специальностей 0520, 0308, 0305, расчёт конвективных поверхностей/Подобед О.П. – К.: КПИ, 1981.
5. *Ши Д.* Численные методы в задачах теплообмена. – М.: «Мир»,1988. – 544 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	5
1.1 Завдання на курсову роботу	6
2 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ АНАЛІТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТОПКОВОЇ КАМЕРИ.....	9
3.1 Розрахунок теоретичних об'ємів продуктів згорання палива	9
2.1.1 Розрахунок коефіцієнту надлишку повітря та його присосів в газовому тракті котла.	10
2.1.2 Розрахунок дійсних об'ємів продуктів згорання.....	11
2.1.3 Розрахунок ентальпії продуктів згорання.	11
2.2 Тепловий баланс котла	12
2.3 Розрахунок топкової камери	15
2.3.1 Розрахунок основних розмірів топкової камери.	15
2.3.2 Розрахунок конструктивних розмірів топкової камери.....	18
2.3.3 Розрахунок теплообміну в топці.	23
3 ВКАЗІВКИ ДО РОЗРОБКИ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ТОПКОВОЇ КАМЕРИ.....	26
3.4.1 Особливості комп'ютерного моделювання топкових екранів в програмі SolidWorks	26
4 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ CDF-МОДЕЛЮВАННЯ ТОПКОВОЇ КАМЕРИ.....	41
4.1 Стислі теоретичні відомості.....	41
8.1.2 Керуючі рівняння.	41
4.2 Корегування моделі топкової камери розробленої в SolidWorks для роботи в середовищі CFX.....	43
4.3 Порядок моделювання спалювання газів засобами CFX.....	45
4.4 Аналіз отриманих результатів та порядок оформлення звіту	48
Перелік посилань:	51